N° 407 \ BIMESTRIEL \ NOVEMBRE-DÉCEMBRE 2016 \ 5 €

DÉCOUVERTE

Revue du Palais de la découverte



MATIÈRE & ÉNERGIE

Les aurores
Voyage du Soleil à la nuit

TERRE & UNIVERS

Ondes gravitationnelles, le cas GW150914

VIVANT \ SANTÉ & ENVIRONNEMENT

Hypnose, aux frontières de l'inconscient

SCIENCE EN SOCIÉTÉ

La Cité des sciences et de l'industrie

Le mouvement perpétuel

Palais DÉCOUVERTE

ISSN 1621-0085

ÉDITO

Ce numéro fait le point sur un phénomène lumineux captivant, aisément observable à l'œil nu, les aurores polaires. *Découverte* détaille le long trajet jusqu'à l'atmosphère terrestre des particules solaires qui sont à l'origine des aurores ainsi que les conditions de leur formation. Pour compléter votre lecture, nous vous invitons à assister à l'exposé effectué avec un « simulateur » d'aurores au Palais de la découverte.

L'année 2016 a été marquée par l'annonce historique en février de la détection directe des ondes gravitationnelles un siècle après leur prédiction par Albert Einstein dans sa théorie de la relativité générale. Ces ondes traversent l'Univers à la vitesse de la lumière et peuvent déformer l'espace. Mais elles sont très difficiles à détecter sur Terre, leur effet y étant infime. *Découverte* dévoile ce que ces ondes apportent dans l'exploration et la compréhension du cosmos.

Autre sujet fascinant, les mécanismes de la conscience, sur lesquels l'hypnose peut agir. *Découverte* revient sur une pratique qui se répand notamment à des fins thérapeutiques, après une histoire chaotique remontant probablement aux pratiques chamaniques de l'Antiquité. Son essor est indéniable au XXe siècle et son efficacité confirmée par des rapports récents de l'Académie de médecine ou de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale.

Évaluer, quantifier et prévoir, comment s'y prendre face à un phénomène aléatoire ? Dans le cas de tirages au sort ou lancers de dés répétés, chaque expérience est indépendante de la précédente. *Découverte* vous raconte comment un mathématicien hongrois, George Pólya, a mis au point en 1931 une méthode donnant au système aléatoire une « mémoire » des événements et des « habitudes » au hasard.

Ce modèle ou ses variantes permettent de décrire des phénomènes capables de s'auto-influencer lors de leur évolution tels que la propagation d'espèces ou d'épidémies. Ils permettent surtout d'estimer quantitativement les différents scénarios de propagation envisageables. Et ce n'est pas un hasard si ce sujet est abordé au moment où sont présentées les expositions *Viral, du microbe au fou rire, tout s'attrape* et *Faites vos jeux ! Quand les maths s'en mêlent* (à partir de décembre 2016) au Palais de la découverte.

Découverte raconte enfin trente ans d'existence de la Cité des sciences et de l'industrie, un anniversaire célébré en mars dernier, avant que 2016 ne passe le relais à 2017, année des quatre-vingts ans du Palais de la découverte, poursuivant ainsi la saison anniversaire 2016-2017 d'Universcience. La rédaction se joint à moi pour vous souhaiter dans l'intervalle d'excellentes fêtes de fin d'année.

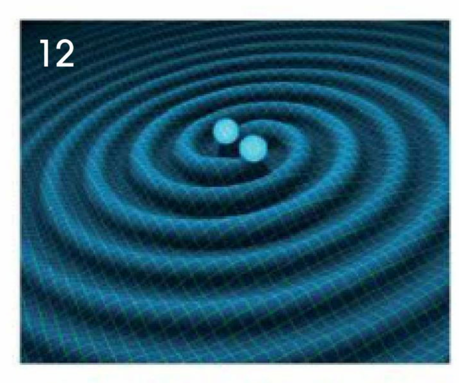
Bruno Maquart

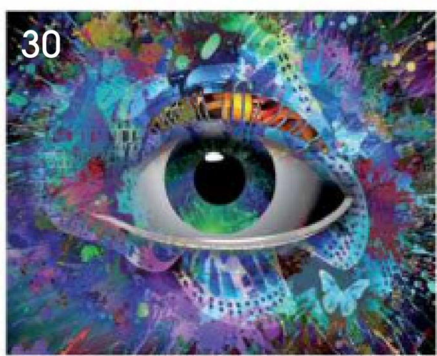
Président d'Universcience – établissement public du Palais de la découverte et de la Cité des sciences et de l'industrie

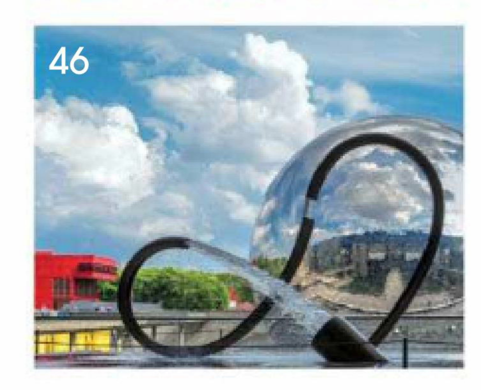
DÉCOUVERTE
N° 407 \ NOVEMBRE-DÉCEMBRE 2016

Fondateur :
A. Jean Rose (1915-1992)
Directeur de la publication :
Bruno Maquart, président de l'établissement public du Palais de la découverte et de la Cité des sciences et de l'industrie – Universcience
Directrice de la rédaction :
Valérie Mathey
Rédacteur en chef :
Jean-Philippe Bricka, assisté de Kamil Fadel et Marie-Agnès Tran Thi Ngoc
Secrétaire de rédaction :
Gaëlle Courty
Maquettiste :
Régis Paillard
Comité de rédaction :
France Agid, Dominique Blaizot, Bernard Chevassus-au-Louis, Michèle Chouchan, Olivier Coulon, Claude Farge, François Gros, Robin Jamet, Olivier Las Vergnas, Arnaud Mayrargue, Pascal Picq, Véronique Polonovski, Anaïs Poncet, Andy Richard et Denis Savoie
Assistante à la revue :
Sylvie Roux
Tél. : 01 40 74 80 93
Vente par correspondance et abonnements :
Valérie Parra y Rodrigo
Tél. : 01 40 74 80 91
Fax : 01 40 74 80 94
Maquette originale :
Serge Nicolas
Photographie de couverture :
© Getty Images / SinghaphanAllB.
Recherches iconographiques :
Florence Chanez et Claire Jullion
Réalisation et adaptation des schémas :
Odile Béourtare
Imprimerie Jouve,
1, rue du Docteur-Sauvé
53100 Mayenne Cedex
Tél. : 02 43 08 25 54
Palais de la découverte,
avenue Franklin-D.-Roosevelt,
75008 Paris
Dépôt légal : novembre 2016









Une naine blanche en laboratoire

Une naine blanche est un objet céleste issu de l'évolution d'une étoile de huit à dix masses solaires dès lors que les réactions thermonucléaires ont cessé en son sein. D'une extrême densité, les naines blanches peuvent aspirer la matière d'une étoile proche. Précisément, le point d'absorption se situe au pôle magnétique de la naine blanche. Une zone bien trop petite pour être observable au télescope. Une collaboration internationale, comprenant plusieurs laboratoires français, a mis en place une expérience utilisant toute l'énergie du laser Orion installé en Grande-Bretagne. Les chercheurs ont pu produire un flot de plasma se déplaçant à 200 kilomètres par seconde et mimer les phénomènes qui surviennent au pôle magnétique d'une naine blanche en train de siphonner une étoile voisine. C'est la première fois qu'une expérience de laboratoire reconstitue une maquette d'un objet céleste. À l'avenir, de telles expériences pourront être réalisées grâce au Laser Mégajoule, installé près de Bordeaux, nettement plus énergétique qu'Orion.
HUBERT DESRUES

Pour en savoir plus : http://le-fil-science.cea.fr/actualites-scientifiques/Pages/sciences-de-la-matiere/siphonner-etoile-reconstitution-laser.aspx

Garder la mémoire de la glace

La glace accumulée dans les glaciers depuis des siècles garde la mémoire de son environnement proche et lointain : composition de l'atmosphère, pollens, poussières, cendres d'éruptions volcaniques, traces de métaux lourds... Autant d'informations qui constituent une banque de données unique et irremplaçable éclairant notamment l'évolution du climat. Hélas ! ce patrimoine est voué à disparaître. Sous l'action du réchauffement climatique, la majorité des glaciers fondent et reculent. Un projet initié en 2015 par le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement à Grenoble se propose de mettre en place un plan de sauvegarde de cette mémoire. La première phase s'est jouée en août 2016 par la collecte au glacier du Dôme, dans le massif du mont Blanc, de trois carottes de glace de 130 mètres chacune. L'une d'elles sera analysée à Grenoble pour constituer une banque de données qui sera mise à disposition de la communauté scientifique. Les deux autres seront acheminées en Antarctique où elles seront conservées sur la base Concordia. Une deuxième mission sera effectuée en 2017 dans les Andes boliviennes sur le glacier Illimani. Suivront d'autres glaciers situés aussi bien en Suisse qu'aux États-Unis, au Brésil ou en Chine... Plusieurs laboratoires européens sont associés à ce projet qui contribue au programme Hydrologie internationale de l'UNESCO (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture). **H. D.**

Pour en savoir plus : http://www2.cnrs.fr/presse/communique/4631.htm

Carotte extraite à 120 mètres de profondeur, au col du Dôme, à 4 250 mètres d'altitude, dans le massif du mont Blanc, dans les Alpes françaises. © B. Jourdain / CNRS.



Sciences de la Terre \ Physique



Près des zones de forte sismicité et sur la même faille se trouvent parfois des régions sans aucune activité tellurique. © Xiefei / fotolia.com.

Des balises acoustiques pour prévoir les séismes

La faille sismique nord-anatolienne porte la responsabilité de nombreux tremblements de terre survenus en Turquie. Or, le long de cette faille, un segment situé au sud d'Istanbul, en mer de Marmara, est exempt de sismicité depuis trois siècles. Est-ce le signe d'un glissement continu, de petites ruptures fréquentes provoquant des microséismes ou d'un blocage total laissant présager un événement catastrophique ? Pour le comprendre, plusieurs laboratoires français du CNRS (Centre national de la recherche scientifique), associés à des chercheurs allemands et turcs, ont utilisé un dispositif innovant. Ils ont installé, à 800 mètres de profondeur, de part et d'autre de ce segment de faille, des balises acoustiques autonomes et consultables à distance. Ces balises s'interrogent mutuellement par paires et mesurent les temps de propagation de l'onde acoustique. Ces temps sont transcrits ensuite en distances. La précision du dispositif est de l'ordre de 1,5 à 2,5 millimètres. Depuis 2014, aucune variation de distance entre les balises n'a été détectée. Les scientifiques en ont déduit que la faille serait en état de blocage ou de quasi-blocage. Ils précisent qu'il faudra cependant trois à cinq ans d'observation pour mieux connaître le comportement de ce segment de faille. **H. D.**

Pour en savoir plus : http://www2.cnrs.fr/presse/communique/4619.htm

Une expérience de retournement du temps

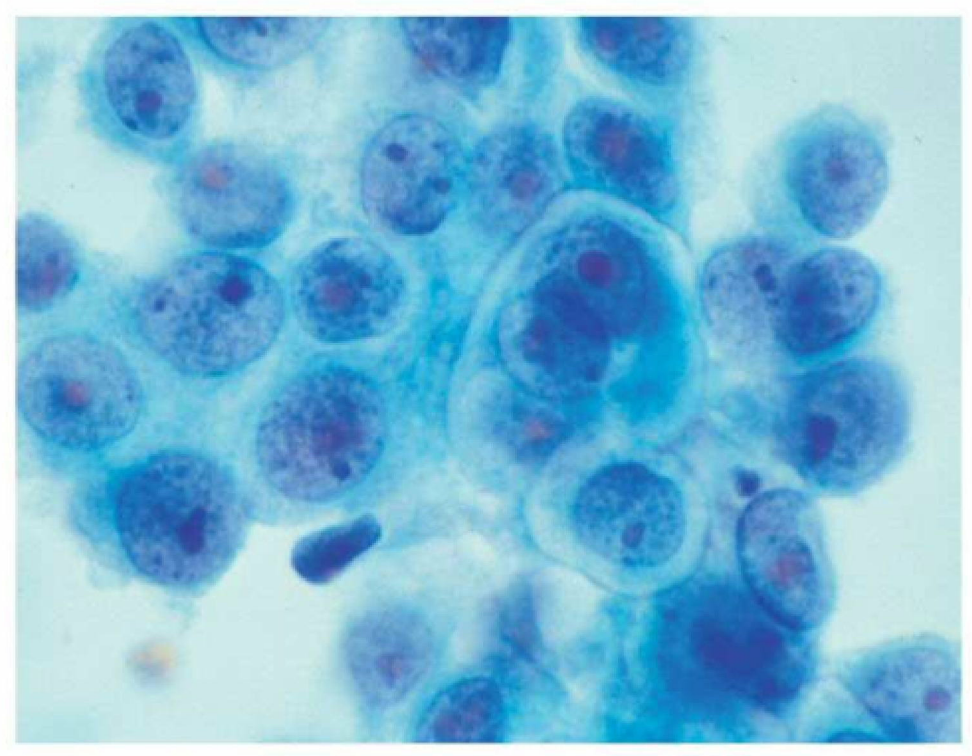
Peut-on faire revivre à une onde sa vie passée ? Une expérience mise au point par deux laboratoires parisiens, l'Institut Langevin « Ondes et Images » et le Laboratoire physique et mécanique des milieux hétérogènes, nous apporte une réponse. Une perturbation de surface est créée dans une cuve remplie d'eau. Il s'ensuit la naissance d'un paquet d'ondes qui va se propager en s'éloignant du point de perturbation. Si une soudaine accélération verticale de vingt fois l'accélération de la pesanteur est appliquée à la cuve pendant quelques millisecondes, le milieu de propagation subit un brusque changement. L'onde se fige et se sépare en deux parties. L'une continue sa propagation, alors que l'autre retourne vers le point de perturbation comme si elle revivait sa vie passée. Tout se passe comme si le changement appliqué au milieu de propagation avait inséré un miroir sur lequel les ondes se seraient réfléchies. Les scientifiques nomment cet effet *miroir temporel instantané*. Ils ont utilisé une petite tour Eiffel comme élément perturbateur de la surface de l'eau, et le paquet d'ondes rétro-propagé a recréé au final l'image de la tour ! L'expérience pourrait s'appliquer aux ondes électromagnétiques voire quantiques, mais il devient compliqué alors de perturber suffisamment vite le milieu de propagation. **H. D.**

Pour en savoir plus : http://www2.cnrs.fr/sites/communique/fichier/cp_retournement_temporel_v3.pdf

Décomposer un son avec un prisme… acoustique

De même que le prisme optique décompose la lumière blanche en ses différentes composantes colorées selon leurs longueurs d'onde, le prisme acoustique décompose un son en ses fréquences constitutives. Mais si des phénomènes de réfraction de la lumière peuvent se rencontrer dans la nature, comme l'arc-en-ciel, le prisme sonore est une invention strictement humaine. C'est une équipe de chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, qui l'a mis au point. L'objet se présente comme un long parallélépipède rectangle en aluminium, ouvert à ses deux extrémités. Le tube de section carrée est percé de dix trous sur l'une de ses faces les plus longues. Chaque trou ouvre sur une cavité aménagée à l'intérieur du tube. Les cavités sont séparées entre elles par une membrane. Si un son est dirigé dans le tube par l'une des extrémités, les hautes fréquences du son sortent par les premiers trous, alors que les plus basses, bien que freinées par les membranes, continuent leur progression pour s'échapper successivement, selon leur fréquence, par les trous les plus éloignés. Une décomposition du son selon les fréquences qui le constituent est bien obtenue. Un tel instrument peut trouver des débouchés pour localiser la direction d'un son distant sans faire appel à des dispositifs électroniques difficiles à déployer. **H. D.**

Pour en savoir plus : http//actu.epfl.ch/news/un-prisme-acoustique-invente-a-l-epfl/



Tumeur du sein. © INSERM / G. Evrard.

Trois nouvelles cibles contre le cancer du sein triple négatif

Des chercheurs français ont identifié un trio protéique intervenant dans une forme agressive du cancer du sein. De premiers tests expérimentaux prometteurs permettent d'envisager plusieurs types de traitements contre la récidive tumorale. Touchant 15 % des femmes atteintes du cancer du sein, celui dit « type triple négatif » est peu sensible aux traitements actuels et aboutit au développement de métastases. Des membres de l'équipe du Centre de recherche en cancérologie de Marseille ont mis en évidence que ce type de cancer impliquait les protéines Prickle1, Mink1 et Rictor, qui activent l'enzyme AKT. Ils ont validé leurs hypothèses en pratiquant des tests expérimentaux *in vitro* (sur des cellules humaines) et *in vivo* (chez la souris). En inhibant l'activité ou en bloquant l'interaction de certaines d'entre elles, les chercheurs ont obtenu des résultats très encourageants : migration tumorale affaiblie, taille de la tumeur primaire réduite et nombre de métastases diminué. Trois stratégies thérapeutiques, ciblant respectivement l'AKT, Mink1 ou l'interaction entre Prickle1 et Rictor, sont envisagées à plus ou moins long terme. Les premiers essais cliniques pourraient débuter d'ici 2020. **GAËLLE COURTY**

Pour en savoir plus : http://www.inserm.fr/actualites/rubriques/actualites-recherche/cancers-du-sein-agressifs-empecher-les-metastases

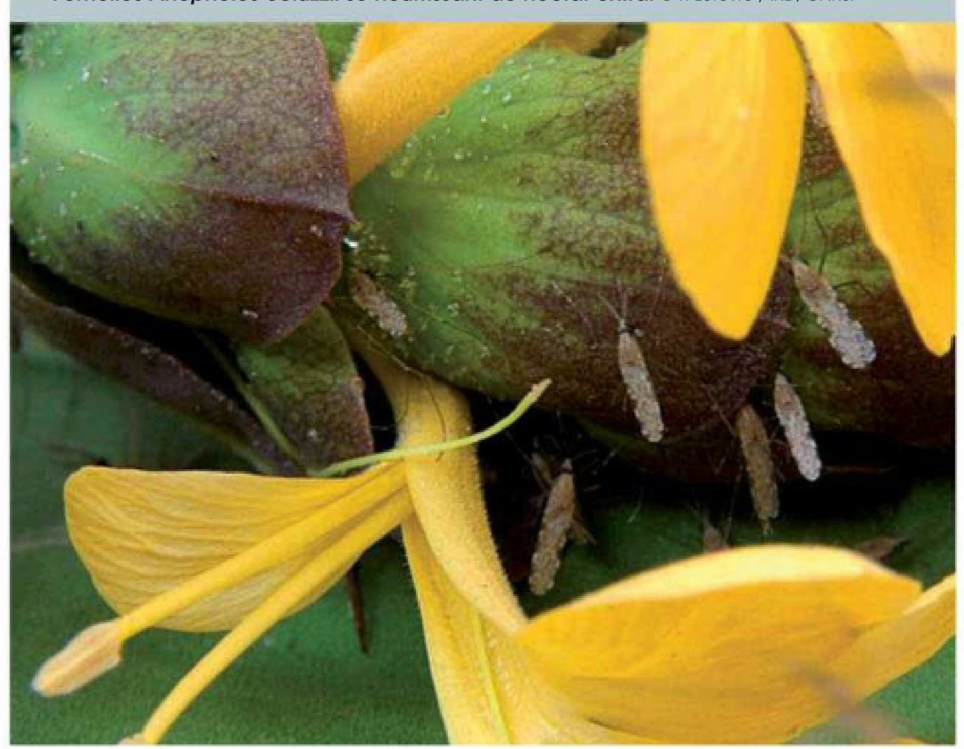
Biologie \ Médecine

La faille « végétale » des parasites du paludisme et de la toxoplasmose

Les agents responsables du paludisme et de la toxoplasmose appartiennent à un même groupe de parasites. Ces parasites sont difficiles à combattre car, sur le plan biologique, ils partagent presque tout avec l'Homme, et les traitements existants causent des effets secondaires. Cependant, depuis une quinzaine d'années, les recherches suggèrent que ces parasites possèdent aussi des caractéristiques biologiques communes avec des plantes. Leur cytoplasme contient un compartiment nommé apicoplaste issu d'une algue microscopique que l'ancêtre de ces parasites se serait approprié. Une équipe de scientifiques français et australiens vient de montrer l'importance de ce compartiment dans la prolifération des parasites du paludisme et de la toxoplasmose dans les cellules humaines. En effet, l'apicoplaste d'origine végétale intervient dans la synthèse d'un grand nombre des lipides constituant la membrane cellulaire du parasite. Les chercheurs ont pu montrer *in vitro* que l'inactivation de cette voie de production de lipides membranaires bloquait la division du parasite, entraînant sa mort. Une perspective pour de nouvelles thérapies ciblant uniquement la partie végétale du parasite, sans affecter l'Homme. **H. D.**

Pour en savoir plus : http://www2.cnrs.fr/presse/communique/4637.htm

Femelles *Anopheles coluzzii* se nourrissant de nectar extra. © T. Lefèvre / IRD, CNRS.



Un cerveau virtuel pour comprendre l'épilepsie

L'épilepsie reste une affection mal comprise. Si 50 % des cas peuvent se prêter à une interprétation visuelle grâce à l'IRM (imagerie par résonance magnétique) et l'électroencéphalographie, l'autre moitié demeure de cause inconnue. Une équipe de chercheurs issus de plusieurs laboratoires de la région d'Aix-Marseille vient de mettre au point un cerveau virtuel personnalisable. À la base, elle a conçu un modèle auquel peuvent s'additionner des informations individuelles provenant de chaque patient. Il en résulte un outil de test et de recherche personnalisé, sur lequel il est possible d'observer où et comment naissent les crises et de quelle façon elles se propagent dans le cerveau. Ainsi, il devient plus aisé d'adapter un traitement avec un maximum de précision. Mais 30 % des épileptiques ne répondent pas aux médicaments. Pour eux, la chirurgie reste le seul espoir. Avec le cerveau virtuel, le chirurgien dispose d'une plate-forme sur laquelle il peut répéter l'opération à pratiquer autant de fois que nécessaire, sans aucun risque pour le patient. Le but ultime de ce dispositif est d'offrir aux praticiens une médecine personnalisée du cerveau. Le cerveau virtuel est à l'essai pour d'autres pathologies comme les maladies neurodégénératives ou la sclérose en plaques. **H. D.**

Pour en savoir plus : http://www2.cnrs.fr/presse/communique/4633.htm

Particules Diesel, un danger pour les fœtus

Nous savons que les particules fines issues des moteurs Diesel sont responsables de nombreuses affections respiratoires. De plus, les données épidémiologiques montrent que les femmes enceintes exposées à ces particules courent le risque d'avoir des bébés de taille et poids inférieurs à la normale. Des chercheurs de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique) viennent de mener une expérimentation sur des lapines qui confirment ces observations. Le lapin a été choisi dans la mesure où son placenta est proche du placenta humain. L'expérience a porté sur des lapines gestantes ayant inhalé les gaz d'échappement des moteurs Diesel d'automobiles équipées de filtres à particules conformes à la réglementation européenne. À la moitié de la gestation, des retards de croissance étaient observables sur les foetus. Les échographies révélaient une diminution significative de l'apport sanguin au placenta, donc un déficit en nutriments des fœtus. À terme, les lapereaux présentaient une longueur de tête ainsi qu'un tour de taille diminués par rapport à la normale. Les chercheurs ont observé au microscope électronique la présence de nanoparticules provenant des gaz d'échappement dans le placenta et le sang des foetus. Sur la deuxième génération, seules des anomalies concernant les échanges de lipides entre mères et foetus ont été constatées. **H. D.**

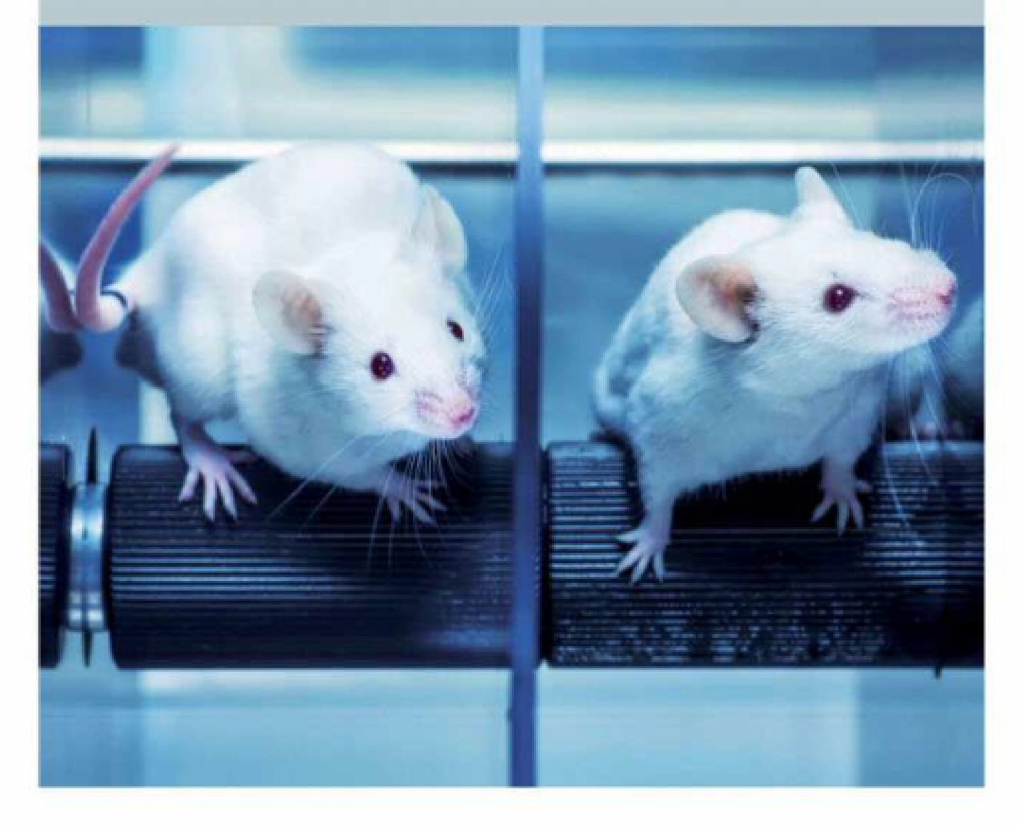
Pour en savoir plus : http://presse.inra.fr/Ressources/Communiques-de-presse/Pollution-aux-gaz-d-echappement-de-moteur-diesel-des-effets-sur-les-faetus-sur-2-generations#

La résistance au stress précisée

La clé d'une adaptation à un stress chronique résiderait dans une meilleure plasticité des neurones du noyau accumbens. La production de lipides nommés endocannabinoïdes dans cette région du cerveau – impliquée notamment dans la gestion des émotions et du stress – serait étroitement liée à cette adaptabilité neuronale. Une découverte réalisée par une équipe de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique) et de l'INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale), dont les travaux ont porté sur des souris soumises à différents types de stress chronique. Les chercheurs ont constaté que certaines d'entre elles résistaient mieux aux situations anxiogènes que leurs congénères. Ils poursuivent ainsi une étude antérieure ayant mis en évidence un lien entre déficit en acides gras oméga-3, perturbant la production des endocannabinoïdes, et augmentation du stress. De nouveaux traitements, en cas de situation de stress ou d'anxiété prolongée, pourraient être développés. **G. C.**

Pour en savoir plus : http://presse.inra.fr/Ressources/Communiques-de-presse/Omega-3-et-gestion-du-stress-les-liens-se-resserrent

Face à des situations de stress chronique, certaines souris sont plus résistantes que d'autres. Une meilleure plasticité cérébrale des neurones situés dans le noyau accumbens serait impliquée. © mrks_v / fotolia.com.



Archéologie \ Entomologie





Le site des fouilles archéologiques du port antique de Naples se trouve en face de la place municipale et à quelques mètres sous le niveau marin actuel. À droite : un exemple de coupe stratigraphique échantillonnée dans le cadre de cette étude. Elle est constituée de vases portuaires dont les compositions isotopiques du plomb révèlent l'histoire romaine de la ville. © H. Delile.

Retour sur deux mille ans d'histoire de Naples

Le 24 août 79, une soudaine éruption du Vésuve provoquait la destruction des villes de Pompéi et d'Herculanum. Parmi les nombreuses questions que se posaient les archéologues, l'une concernait l'aqueduc Aqua Augusta alimentant Naples et ses environs en eau. À l'occasion de travaux d'agrandissement du métro de Naples, des fouilles menées par plusieurs laboratoires du Centre national de la recherche scientifique ont pu être entreprises dans le port antique de la ville, aujourd'hui enseveli. L'analyse des sédiments amassés révèle que pendant les six premiers siècles de notre ère, l'eau du port a subi une contamination au plomb due à la nature des canalisations du système de distribution d'eau. Ces analyses ont montré l'existence de deux variétés isotopiques distinctes de plomb dans ces sédiments, l'une trouvée avant 79, l'autre après. Il semble donc bien établi que l'éruption du Vésuve survenue il y a deux mille ans a endommagé les installations hydrauliques de la ville de Naples, dont l'aqueduc. La remise en état des canalisations s'est étendue ensuite sur une quinzaine d'années avec un plomb provenant d'une mine différente du métal d'origine. Dès le début du Ve siècle, la pollution au plomb a décru, signant l'aube d'une période de déclin économique et politique de la région. **H. D.**

Pour en savoir plus : http://www2.cnrs.fr/presse/communique/4543.htm

L'abeille et le drone

En étudiant le comportement de l'abeille verte à orchidées des forêts du Panama, deux chercheuses de l'université de Lund (Suède) ont constaté qu'elle savait parfaitement naviguer rapidement en toute sécurité dans un environnement complexe. Il est primordial en effet pour cet insecte qui évolue dans un milieu dense en obstacles d'éviter les collisions. L'abeille utilise l'intensité de la lumière qui filtre au travers des feuillages pour déterminer sa ligne de vol en toute sécurité. Sa stratégie est simple. Le cerveau de l'abeille évalue en permanence la vitesse du vol et sa hauteur par rapport au sol. Le défi consiste à s'assurer que les obstacles viennent vers elle à une vitesse constante. D'où un vol moins rapide en milieu dense, plus sombre, qu'en terrain découvert, mieux éclairé. Les deux membres de la Jeune Académie de Suède ont imaginé que le système pouvait être transposé aux drones. Ces robots aériens pourraient adapter alors leur vitesse et leur direction à leur environnement, sans intervention humaine à distance. Les deux chercheuses pensent qu'entre cinq et dix ans de développement seront nécessaires pour compléter leur étude sur les abeilles et transformer les résultats biologiques en modèles mathématiques et systèmes numériques. **H. D.**

Pour en savoir plus : http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique/veille-scientifique-et-technologique/suede/article/l-etude-des-abeilles-pourrait-permettre-aux-drones-de-voler-de-facon

Curiosités célestes
Janvier-février 2017

PAR **ALAIN REDDING** ET **ANDY RICHARD**, MÉDIATEURS SCIENTIFIQUES, UNITÉ ASTRONOMIE-ASTROPHYSIQUE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Système jovien

Le 5 juillet 2016, la sonde américaine Juno a été placée en orbite autour de la planète dominante de notre système solaire : Jupiter. Les premières images du système jovien sont parvenues rapidement, dévoilant la planète gazeuse et ses principales lunes.



Image en couleurs de Jupiter et trois de ses quatre satellites principaux prise par la sonde Juno après son entrée en orbite autour de la planète, le 10 juillet 2016. Juno se trouvait alors à 2,7 millions de kilomètres de Jupiter. © NASA / JPL.

Lancée en août 2011, la sonde Juno (NASA, National Aeronautics and Space Administration) est arrivée dans le système jovien après cinq années de voyage. Son objectif : étudier la structure interne de Jupiter afin d'apporter des éléments de réponse quant à sa composition et sa formation. En effet, Jupiter est probablement la première planète du système solaire à s'être formée. Elle est composée principalement des mêmes gaz que le Soleil : hydrogène et hélium. Étudier Jupiter, c'est donc étudier la composition du système solaire primitif.

Les secrets de Jupiter seront scrutés par la sonde grâce à sa batterie d'instruments embarqués : magnétomètres, caméras dans le visible, l'ultraviolet, l'infrarouge, les ondes radio et les micro-ondes, etc. Tous les outils sont utilisés pour analyser l'atmosphère de la planète géante et ce qui se cache dans ses profondeurs. Juno pourra statuer également sur l'existence ou non d'un noyau solide au cœur de la planète gazeuse et contraindre sa taille. Juno emprunte elle aussi son nom à la mythologie : elle est l'épouse de Jupiter, qui dévoile les secrets du dieu dissimulés derrière ses épais nuages. **An. R.**

Phénomènes intéressants

EN TEMPS UNIVERSEL

Il convient d'ajouter une heure pour obtenir l'heure légale. Les distances angulaires exprimées lors des rapprochements entre les planètes, ainsi qu'entre la Lune (depuis son centre) et les planètes, correspondent à des conjonctions en ascension droite et sont calculées par l'IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides) pour un observateur situé au centre de la Terre. L'unité astronomique (UA) est une mesure de distance valant 149 597 870,7 kilomètres.

JANVIER



Ciel du 31 janvier à Paris à 20 heures en direction du sud-ouest. Logiciel libre Stellarium GNU General Public License.

2 : au coucher du Soleil, retrouvez la lueur brillante de Vénus au-dessus de l'horizon sud-ouest. La planète est accompagnée par un mince croissant de Lune visible dans la constellation du Verseau. Dans l'alignement, la planète Rouge domine plus à l'est. La Lune passe à 1° 54' au nord de Vénus à 9 h 19, puis à 24' au nord de Mars à 4 h 12 le lendemain matin.

4 : alors que l'hiver débute seulement dans l'hémisphère nord, le Soleil se trouve au périgée (distance minimale à la Terre) à 14 h 17, à 0,983 31 UA. Rappelons que le phénomène des saisons est dû principalement à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre.

10 : à 6 h 00, la Lune est au périgée à 363 238 km.

19 : en seconde partie de nuit, le lever du quartier de Lune est suivi de près par celui de Jupiter dans la constellation de la Vierge. Notre satellite passe à 2° 42' au nord de l'astre jovien à 5 h 27.

22 : à 0 h 13, la Lune est à l'apogée (distance maximale à la Terre) à 404 914 km.

31 : au coucher du Soleil, la Lune rend de nouveau visite à Vénus. Notre satellite passe à 4° 4' au sud d'elle à 14 h 33. Les observateurs retrouveront ainsi la Lune, Vénus et Mars formant un magnifique triangle dans le ciel du couchant en direction du sud-ouest. La Lune passera ensuite à 2° 20' au sud de Mars le 1er février à 1 h 08.

FÉVRIER



Ciel du 16 février à Paris à 1 heure en direction du sud-est. Logiciel libre Stellarium GNU General Public License.

6 : à 14 h 02, la Lune est au périgée à 368 815 km.

10 : dans la nuit du 10 au 11 février, la pleine Lune sera éclipsée par la pénombre. Cette éclipse sera visible depuis la France entre 22 h 34 et 2 h 53. Lors d'une éclipse par la pénombre, l'éclat de la pleine Lune est atténué par la Terre qui vient masquer une partie de la lumière du Soleil.

15 : en seconde partie de nuit, observez la Lune gibbeuse dans la constellation de la Vierge en direction du sud-est. Elle accompagne la planète Jupiter après son rapprochement avec cette dernière. Ce jour-là, la Lune passe à 2° 42' au nord de Jupiter à 14 h 56.

18 : à 21 h 13, la Lune est à l'apogée à 404 376 km.

20 : la Lune passe à 3° 35' au nord de Saturne à 23 h 24. Ce rapprochement est à retrouver au sud-est avant le lever du Soleil du 21 février : le croissant de Lune a dépassé la planète Saturne dans la constellation du Serpentaire et poursuit sa course en direction du Soleil.

26 : une éclipse annulaire aura lieu au-dessus de l'océan Atlantique durant la journée. Cette éclipse ne sera pas visible depuis la France, mais le sera depuis l'Amérique du Sud. **A. R. et An. R.**

Phases de la Lune



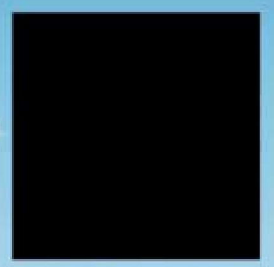
PREMIER QUARTIER
5 janvier à 19 h 46
4 février à 4 h 18



PLEINE LUNE
12 janvier à 11 h 33
11 février à 0 h 32



DERNIER QUARTIER
19 janvier à 22 h 13
18 février à 19 h 33



NOUVELLE LUNE
28 janvier à 0 h 07
26 février à 14 h 58

Visibilité des planètes (à l'œil nu)



MERCURE

Janvier/février : début janvier, Mercure s'écarte angulairement à l'ouest du Soleil. Elle peut être aperçue au-dessus de l'horizon dans les lueurs du levant au milieu du mois. Elle reprend ensuite sa course vers le Soleil le 19 janvier et se perd rapidement dans la lumière du jour. Elle est inobservable en février.



VÉNUS

Janvier/février : Vénus est en plus grande élongation est à 47° 9' le 12 janvier. Elle est visible parfaitement et très brillante au-dessus de l'horizon sud-ouest au coucher du Soleil durant ces deux mois.



MARS

Janvier/février : Mars est visible au sud-ouest durant la première partie de nuit au cours de ces deux mois. Elle quitte la constellation du Verseau pour celle des Poissons à la fin du mois de janvier.



JUPITER

Janvier/février : durant ces deux mois, Jupiter est visible en seconde partie de nuit dans la constellation de la Vierge. Le Soleil s'écarte angulairement de la planète et cette dernière se lève de plus en plus tôt.



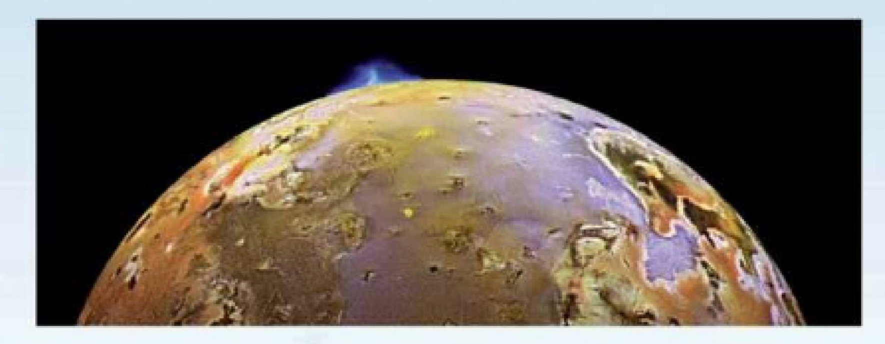
SATURNE

Janvier/février : en janvier, Saturne commence à apparaître au-dessus de l'horizon sud-est au lever du Soleil. Celui-là s'écarte angulairement de la planète et Saturne se lève donc un peu plus tôt chaque matin. Elle est visible parfaitement dans la constellation du Serpentaire en toute fin de nuit en février. **A. R. et An. R.**

À l'exploration de Io, astre volcanique

La planète géante Jupiter est accompagnée d'une flotte de satellites naturels. Parmi les 67 connus aujourd'hui, quatre découverts par Galilée (1564-1642) se démarquent particulièrement par leur éclat et leur taille. Le plus proche de la planète se nomme Io, très actif et dont la surface est torturée par Jupiter.

Image composite de Io et Jupiter, photographiées durant le survol de la sonde New Horizons à destination de Pluton le 1er mars 2007. Une éruption peut être aperçue sur la face nocturne nord du satellite.
© NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Southwest Research Institute / Goddard Space Flight Center.



Mosaïque d'images prises par Galileo (en orbite autour de Jupiter entre 1995 et 2003) montrant une éruption volcanique à la surface d'Io.
© NASA / JPL.

SATELLITE VÉLOCE

En mars 1610, Galilée publie dans *Sidereus Nuncius* les résultats de ses observations à la lunette astronomique. Parmi eux, la découverte de quatre petites étoiles orbitant autour de Jupiter. Les astres médicéens, comme il les appelle alors, ne sont autres que les quatre lunes principales de la planète, ou satellites galiléens d'après la dénomination actuelle.

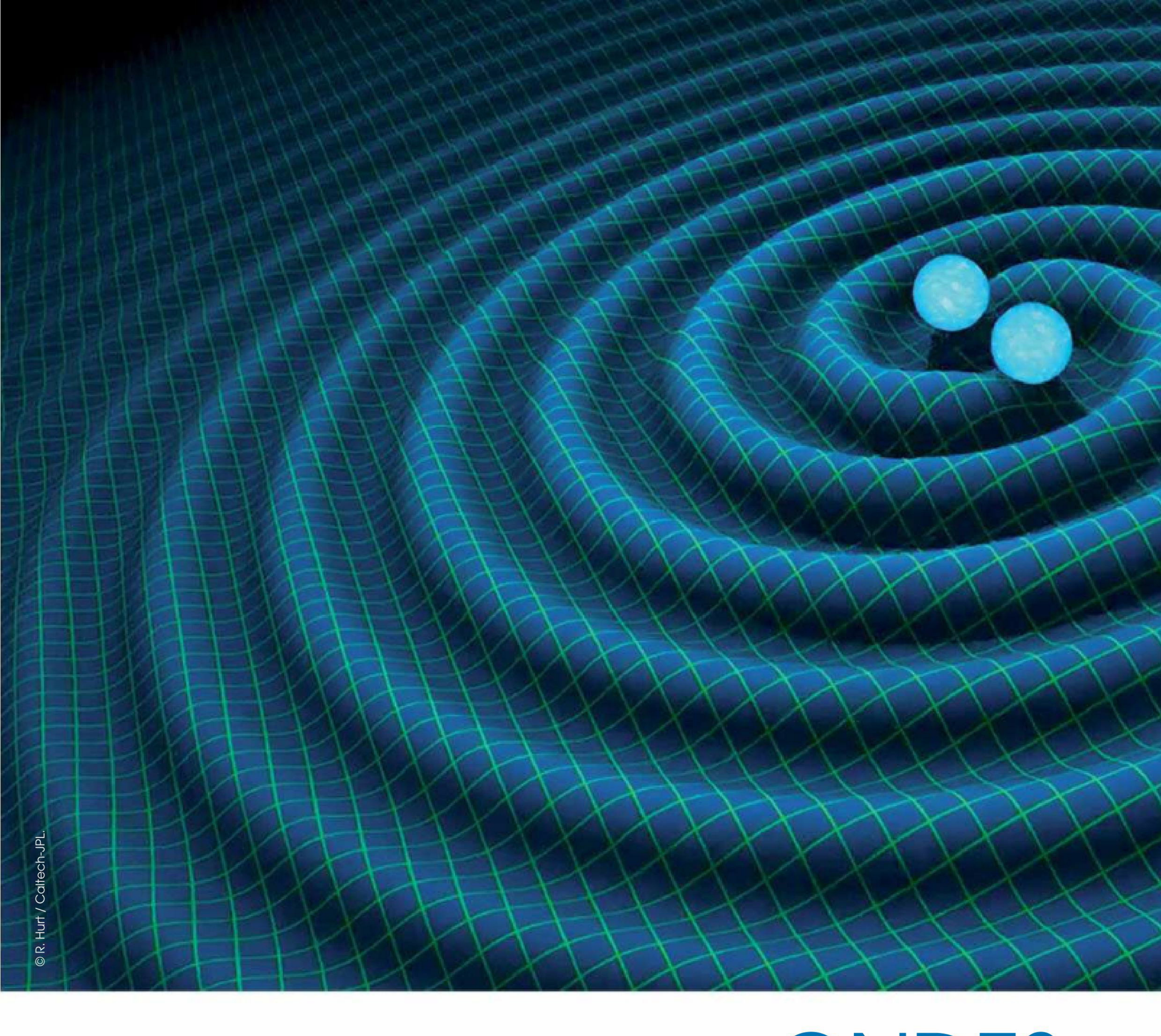
Le premier de ces satellites sera baptisé Io par l'astronome allemand Simon Marius (1573-1625), une suggestion de Johannes Kepler (1571-1630) qui imagine autour du dieu Jupiter le ballet incessant de ses amants. Située à 422 000 km de Jupiter, Io en effectue le tour en seulement 1 jour et 19 heures. Le satellite est donc animé d'un mouvement extrêmement rapide : sa vitesse orbitale dépasse 60 000 km/h, bien plus que les 3 600 km/h de la Lune autour de la Terre.

D'un diamètre de 3 643 km, Io est à peine plus grande que notre satellite, mais sa face très différente. Composée essentiellement de silicates et de fer, Io exhibe des centaines de volcans en surface, certains actifs. Tout comme la Lune, un objet de cette taille dans le système solaire devrait être refroidi depuis plusieurs milliards d'années et ne plus présenter aucune activité. Pourtant, la sonde Voyager 1 enregistra des éjections de lave sur Io en 1979, première observation d'un phénomène volcanique extraterrestre.

LES MARÉES D'IO

La sonde Galileo (NASA, National Aeronautics and Space Administration), dans les années 1990, a mesuré des températures de lave atteignant 1 300 °C. Pour un satellite avec une température moyenne de surface de –155 °C, l'origine de cette chaleur interne est à rechercher dans un phénomène bien connu sur Terre : les marées.

En effet, Io se trouve si proche de la planète géante que cette dernière étire et déforme le satellite par sa force gravitationnelle considérable. Cet étirement, semblable à celui des océans terrestres sous l'effet de l'attraction de la Lune et du Soleil, se produit sur la roche composant Io : le sol se soulève et s'abaisse de plusieurs centaines de mètres toutes les 21 heures et 30 minutes ! Une déformation colossale et rapide provoquant des frictions dans le manteau rocheux et la fonte des roches en profondeur. Io est donc réchauffée perpétuellement par l'attraction de Jupiter et continue aujourd'hui de nous le montrer par les volcans et éruptions apparaissant régulièrement à sa surface. **An. R.**

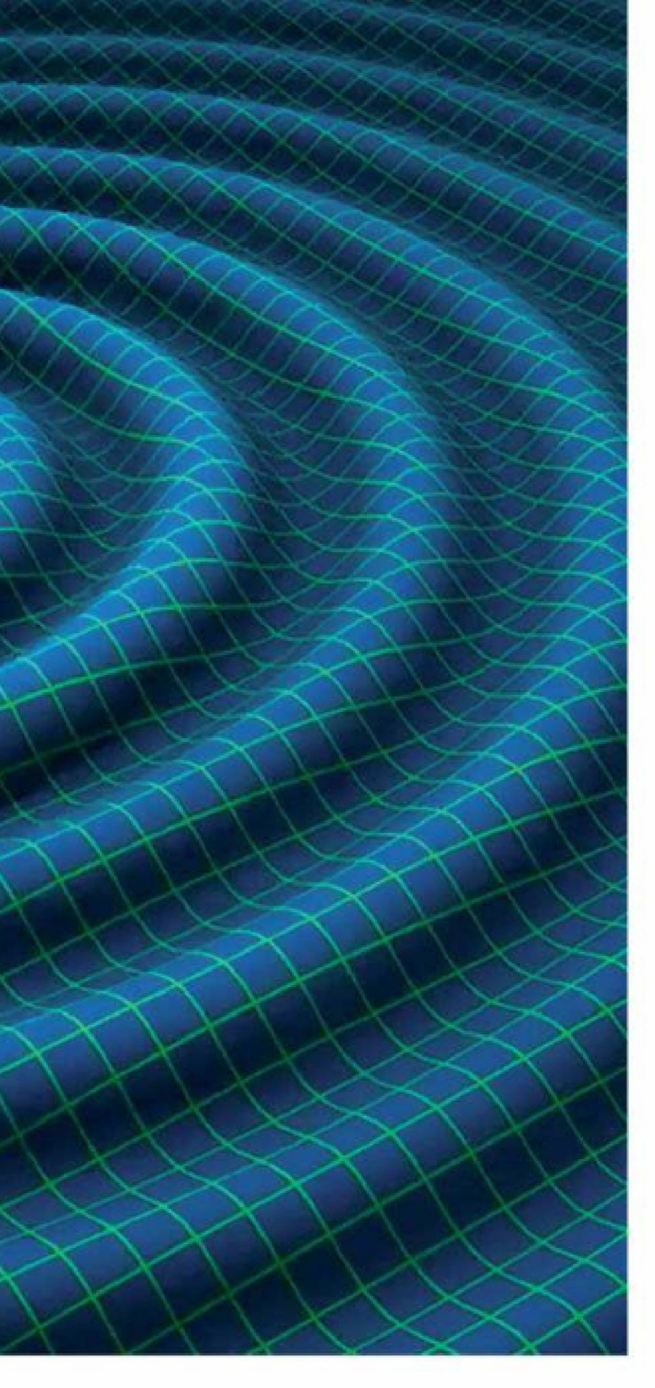

© R. Hurt / Caltech-JPL.

ONDES GRAVITATIONNELLES

Le cas GW150914

Albert Einstein avait prédit l'existence des ondes gravitationnelles il y a cent ans. Aujourd'hui, grâce à des détecteurs de haute précision, les observations confirment cette conjecture. Comment les ondes gravitationnelles vont-elles changer notre connaissance de l'Univers ?

PAR **MÉLANIE HABOUZIT**, UNITÉ ASTRONOMIE-ASTROPHYSIQUE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE



Nous en sommes sûrs maintenant : les ondes gravitationnelles existent. Les équipes des missions LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, aux États-Unis) et Virgo (en Europe) l'ont annoncé le 11 février 2016. Un événement exceptionnel ! C'est la première détection directe d'onde gravitationnelle, la première preuve directe de l'existence des trous noirs stellaires, la première observation d'un système composé de deux de ces trous noirs fusionnant et, enfin, le premier test de la relativité générale dans un milieu de très forte gravité. Comment la théorie de la relativité d'Albert Einstein (1879-1955) a-t-elle amené à prédire l'existence d'ondes gravitationnelles ? Comment les scientifiques sont-ils parvenus à les détecter ? Que va nous apporter cette découverte pour les prochaines décennies ?

ÉMERGENCE DE LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE D'EINSTEIN

La théorie de la gravitation universelle d'Isaac Newton (1643-1727) paraît en 1687. Elle énonce que temps et espace sont deux entités bien distinctes. La gravité est une force, qui s'exerce entre deux corps et qui dépend de leurs masses et de la distance les séparant.

En 1915, Einstein publie sa théorie de la relativité générale. Cette nouvelle théorie de la gravitation généralise et englobe celle de Newton (sorte d'approximation de la théorie de la relativité d'Einstein). Les lois de la gravité décrites par la relativité générale sont de mieux en mieux vérifiées, et ce, à différentes échelles spatiales, du système solaire aux étoiles binaires.

La théorie de la relativité générale ne s'est pas construite en un jour. Nous récapitulons ici les principaux fondements et idées qui ont permis son édification. En 1905, Einstein introduit le concept révolutionnaire d'espace-temps. Espace et temps ne sont plus deux entités distinctes et absolues comme dans la théorie de Newton(1), mais indissociables, pouvant agir l'une sur l'autre. La théorie de la relativité restreinte est née.

C'est en voulant intégrer la théorie de la gravitation à celle de la relativité restreinte qu'Einstein est amené à redéfinir sa théorie : la théorie de la relativité générale fait ses débuts. L'idée principale émerge en 1907 ; il s'agit de l'équivalence entre gravitation et accélération (principe d'équivalence). Nous connaissons tous l'histoire de Newton réfléchissant sous un pommier, quand soudain une pomme se détache de l'arbre et tombe sur sa tête. Newton explique ce phénomène par la gravitation : la Terre, par son importante masse, attire la pomme *via* une force d'attraction. Connaissez-vous l'anecdote d'Einstein ?

(1) Isaac Newton définit précisément les concepts de temps et d'espace dans *Principia* : « le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément et s'appelle durée ». Le temps est donc une entité mathématique, identique pour tous les observateurs, et l'espace un principe mathématique absolu permettant de définir des repères pour déterminer le mouvement des corps.



Se trouvant dans un ascenseur arrêté, il lâche une pomme qui tombe sur le sol à cause de la gravité. Tout comme la pomme de Newton. Maintenant, imaginons que l'ascenseur n'est plus soumis à la force de gravité mais en mouvement accéléré (de même intensité que la gravité) : il monte de plus en plus vite. Si Einstein lâche à nouveau sa pomme, elle tombera de la même manière, non plus à cause de la gravité de la Terre, mais parce que l'ascenseur est accéléré. Dès lors, pour Einstein, accélération et gravitation sont deux phénomènes équivalents.
Comment serait perçu un rayon lumineux (produit par exemple par un laser) par Einstein dans l'ascenseur ? Si une personne, située hors de l'ascenseur, allume un laser, elle voit le faisceau décrire une trajectoire rectiligne (en ligne droite). En revanche, dans l'ascenseur accéléré, Einstein verra une trajectoire du laser courbée, car la distance entre le rayon lumineux et lui évolue, ce dernier étant en mouvement. D'après le principe d'équivalence de l'accélération et la gravitation, cela revient à dire que si Einstein était dans l'ascenseur, cette fois immobile et sur Terre, subissant la gravité de la planète, il devrait voir également la courbure du laser. On pourrait dire ainsi que l'accélération, ou la gravité, courbe les rayons lumineux du laser.
Cette expérience de pensée illustre la déduction d'Einstein : les objets pourvus d'une masse déforment l'espace-temps. Celui-là n'est plus rigide et invariant, il est modifié par les corps massifs qui induisent des effets de courbure de l'Univers. Un rayon lumineux a une trajectoire rectiligne dans le vide, mais au voisinage d'un corps massif, suivant la courbure de l'espace-temps, il est dévié, déformé. C'est la relativité générale.
Nombreuses ont été les prédictions d'Einstein et de la relativité générale déjà démontrées : avance anormale du périhélie de Mercure en 1915, déviation de la lumière lors d'une éclipse de Soleil en 1919, décalage gravitationnel (deux horloges placées dans des champs gravitationnels différents n'avancent pas à la même vitesse) et enfin ondes gravitationnelles le 14 septembre 2015.

PREMIÈRE PREUVE DE L'EXISTENCE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

C'est en 1916, juste après avoir publié les équations de la relativité générale, qu'Einstein avance l'idée des ondes gravitationnelles. Tout mouvement accéléré d'une masse produirait une onde, dite *gravitationnelle*, qui se propagerait dans l'Univers à la vitesse de la lumière. Les ondes gravitationnelles sont donc des vibrations de l'espace-temps.
Le système binaire PSR B1913+16, constitué de deux étoiles orbitant l'une autour de l'autre, a été découvert par Russell Hulse et Joseph Taylor en 1974. Il est à l'origine de la première détection indirecte des ondes gravitationnelles et aura valu à ces astronomes d'obtenir le prix Nobel de physique en 1993. L'une des étoiles du système émet un signal radio dans une direction particulière. À cause de la rotation de l'étoile, nous captons ce signal comme une impulsion (pulse) : l'étoile est appelée ainsi pulsar. Nous recevons donc sur Terre une série de pulses, correspondant à la période de rotation de l'astre, toutes les 59 millisecondes pour PSR B1913+16. Le temps entre deux pulses est normalement régulier, mais pour PSR B1913+16, de petites variations sont observées, indiquant qu'il est en réalité en mouvement dans le système. Dans ce cas précis, l'astre qui émet les pulses est une étoile à neutrons. Des incertitudes demeurent quant à l'autre étoile, appelée étoile compagnon ; il s'agirait probablement d'une autre étoile à neutrons[2] dont les impulsions ne sont pas détectées. L'observation de PSR B1913+16 pendant plusieurs années a permis de montrer que la vitesse de rotation des deux astres augmente (l'écart entre deux pulses successifs diminue)

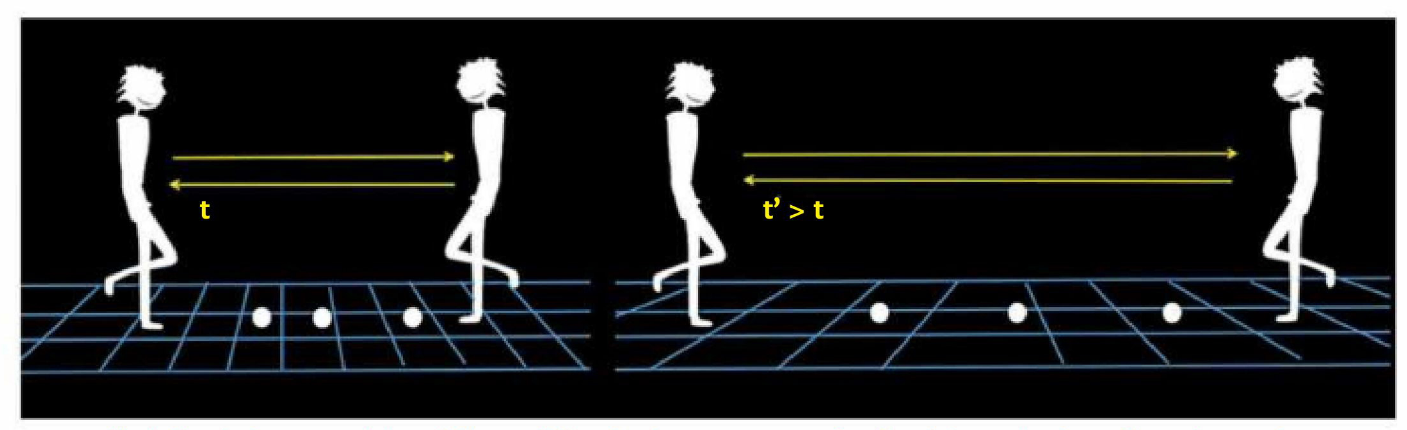


Figure 1. Illustration de la mesure de la variation spatiale entre deux personnes grâce à un faisceau lumineux, à gauche avant le passage des ondes gravitationnelles, à droite après leur passage. La règle physique, graduée ici avec des petits cailloux, a évolué en même temps que la distance entre les personnages, et ne peut donc pas être utilisée pour déceler des variations spatiales. © M. Habouzit.

et donc que la période orbitale diminue : les étoiles se rapprochent l'une de l'autre. Des modèles théoriques ont réussi à reproduire l'évolution de ce système et son accélération, en considérant qu'une partie de son énergie devait être dissipée par l'émission d'ondes gravitationnelles, comme prédit par la théorie de la relativité générale. Ce système binaire d'étoiles constitua la première preuve, indirecte, de l'existence des ondes gravitationnelles, confortant au passage la véracité de la théorie de la relativité générale. Il confirme que les objets denses de systèmes binaires interagissent *via* des ondes gravitationnelles. Toutefois, nous n'avions pas encore la preuve que de telles ondes étaient capables de voyager dans le cosmos.

FONCTIONNEMENT DES DÉTECTEURS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

Comment observer directement ces ondes gravitationnelles provenant de systèmes lointains ? Des détecteurs terrestres ou spatiaux suffisamment précis peuvent-ils être construits ?

Les ondes gravitationnelles ont pour effet de dilater ou contracter les longueurs sur leur passage : elles provoquent une déformation de l'espace. Cette minuscule variation des distances est très difficile à mesurer. On pourrait imaginer graduer très précisément une portion de l'espace entre deux personnes, mais cette « règle » verrait également sa longueur varier au passage de l'onde, rendant impossible la mesure. En revanche, il existe une méthode basée sur une propriété intrinsèque de la lumière : elle voyage à vitesse constante.

L'idée est la suivante : l'envoi d'un faisceau laser sur un miroir positionné à une certaine distance, puis sa récupération à la source permettent de mesurer la durée de l'aller-retour du faisceau. Si la distance entre la source et le miroir s'allonge, le faisceau mettra plus de temps à retourner à la source ; une perturbation faisant varier les longueurs serait ainsi détectée (fig. 1).

C'est un principe simple mais difficile à mettre en œuvre, utilisé pour la première détection directe d'ondes gravitationnelles par LIGO. Le dispositif fonctionne comme un interféromètre de Michelson (encadré éponyme). Il se compose de deux bras perpendiculaires de plusieurs kilomètres de long (4 km pour le dispositif LIGO et 3 pour celui de Virgo). Un



(2) Les étoiles massives, après avoir passé plusieurs millions d'années à brûler leur carburant, c'est-à-dire à transformer les atomes qui les composent, s'effondrent en éjectant leurs couches les plus externes en explosions appelées supernovæ. Elles forment alors des étoiles à neutrons, très compactes, constituées principalement de neutrons maintenus ensemble par la gravité.

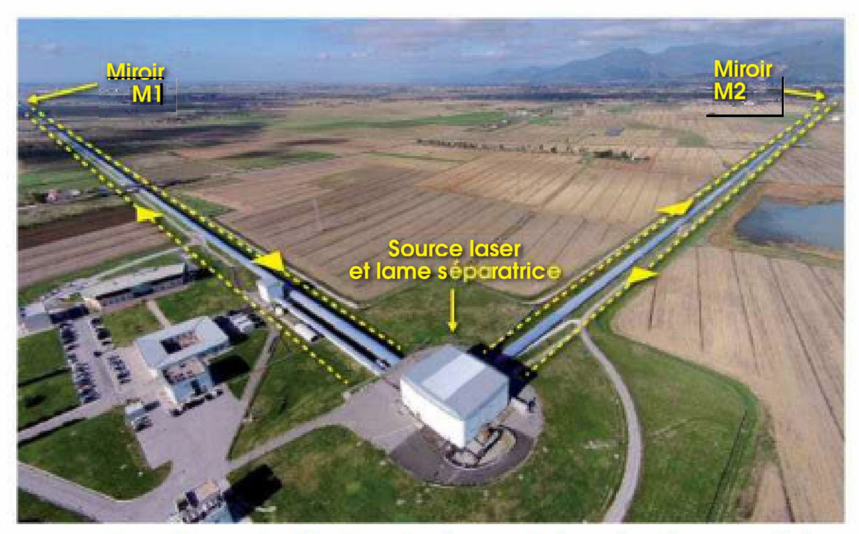


Figure 2. Vue aérienne du détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo, constitué de deux bras de plusieurs kilomètres chacun, avec à leur bout un miroir. Une source de lumière est placée sur le dispositif central. © CCO.



faisceau laser composé de photons est émis par la source et scindé en deux par une séparatrice. Chaque faisceau poursuit son trajet, sur chacun des bras, jusqu'à atteindre un miroir sur lequel les photons sont réfléchis afin de revenir vers la séparatrice et, enfin, sur le détecteur (fig. 2). Si les deux faisceaux reviennent au même instant, c'est qu'ils ont parcouru la même distance.

Mais une onde gravitationnelle traversant la Terre provoque une infime vibration de l'espace-temps, qui altère la longueur des bras. Ceux-là sont déformés différemment puisqu'ils sont perpendiculaires. Les photons vont voyager ainsi sur une distance plus grande dans l'un des deux bras, et donc mettre plus de temps pour rejoindre le détecteur. Les photons ne sont plus en phase lorsqu'ils y parviennent : un signal proportionnel à l'amplitude des ondes gravitationnelles est détecté !

La détection de ces ondes revient à identifier de très faibles variations temporelles entre des signaux. Un ensemble de détecteurs, disséminés dans le monde, permet d'éviter toute détection sporadique, due à l'activité sismique de la Terre par exemple. Si ces variations temporelles sont observées simultanément (à quelques millisecondes près) à deux endroits différents de la planète au moins, alors nous avons la certitude que le signal provient du cosmos et non d'une activité terrestre localisée. La collaboration scientifique travaillant sur les ondes gravitationnelles compte aujourd'hui six détecteurs en fonctionnement ou en projet : LIGO Hanford, LIGO Livingston, Virgo en Italie, GEO600 en Allemagne, TAMA 300 (KAGRA) au Japon et LIGO-India en Inde (fig. 3). Malheureusement, le jour où l'événement GW150914 a été observé, seuls les détecteurs de Hanford et Livingston étaient en service, Virgo étant en maintenance et les trois autres non fonctionnels. À noter que les

Interféromètre de Michelson

En 1887, Albert A. Michelson (1852-1931) et Edward Morley (1838-1923) proposent un dispositif astucieux, l'interféromètre de Michelson, pour mesurer l'invariance de la vitesse de la lumière dans l'éther, « support » dont on pensait à l'époque que la Terre était entourée. De façon plus générale, cet instrument permet la détermination de longueurs d'onde, de la largeur spectrale d'une source lumineuse ou d'indices de réfraction de milieux.

L'interféromètre de Michelson se compose principalement de deux miroirs plans, M1 et M2, et d'une lame de verre à faces parallèles et semi-transparente Ls, dite séparatrice, inclinée à 45 degrés par rapport à M1 et M2. La séparatrice sert de diviseur d'amplitude de l'onde lumineuse ; le faisceau lumineux est donc séparé dans les deux bras de l'interféromètre.

Les deux rayons qui sortent de la séparatrice voyagent de la même façon dans les bras B1 et B2. Ils se réfléchissent ensuite respectivement sur les miroirs M1 et M2. Les rayons reviennent vers la source du dispositif : ils constituent le signal retour. Si M1 et M2 sont placés exactement à la même distance de la séparatrice, c'est-à-dire si les bras B1 et B2 ont même longueur, alors les signaux provenant de ces deux bras sont identiques : ils sont en phase. En revanche, si l'un des deux bras est plus grand, l'un des deux signaux est en « retard » par rapport à l'autre : les signaux ne sont plus en phase.

LIGO Hanford
GEO600
Virgo
KAGRA
LIGO Livingston
LIGO-India

Figure 3. Carte de la collaboration des détecteurs d'ondes gravitationnelles. L'ensemble des détecteurs permet de mieux contraindre le signal et ainsi de localiser plus efficacement sa source.
© kartoxjm / fotolia.com.

détecteurs sont améliorés régulièrement, et donc de plus en plus précis. C'est d'ailleurs la toute nouvelle génération de détecteurs installés sur le dispositif LIGO qui a permis la réception du signal GW150914.

COMPRENDRE LE SIGNAL RECUEILLI

Le 14 septembre 2015, le signal GW150914 a été détecté dans un premier temps par le dispositif de LIGO Livingston, en Louisiane (États-Unis). Moins de 7 millisecondes plus tard, un signal similaire a été détecté par le dispositif de LIGO Hanford, dans l'État de Washington (États-Unis) (fig. 4). La durée totale du signal était inférieure à 1 seconde ! Après analyse du signal, nous avons appris que la source se situait à environ 400 mégaparsecs de la Terre, c'est-à-dire que l'événement ayant émis ces ondes gravitationnelles a eu lieu il y a 1,3 milliard d'années. La différence entre les temps d'arrivée du signal sur les deux détecteurs LIGO permet aussi de préciser la direction de l'événement dans le ciel.



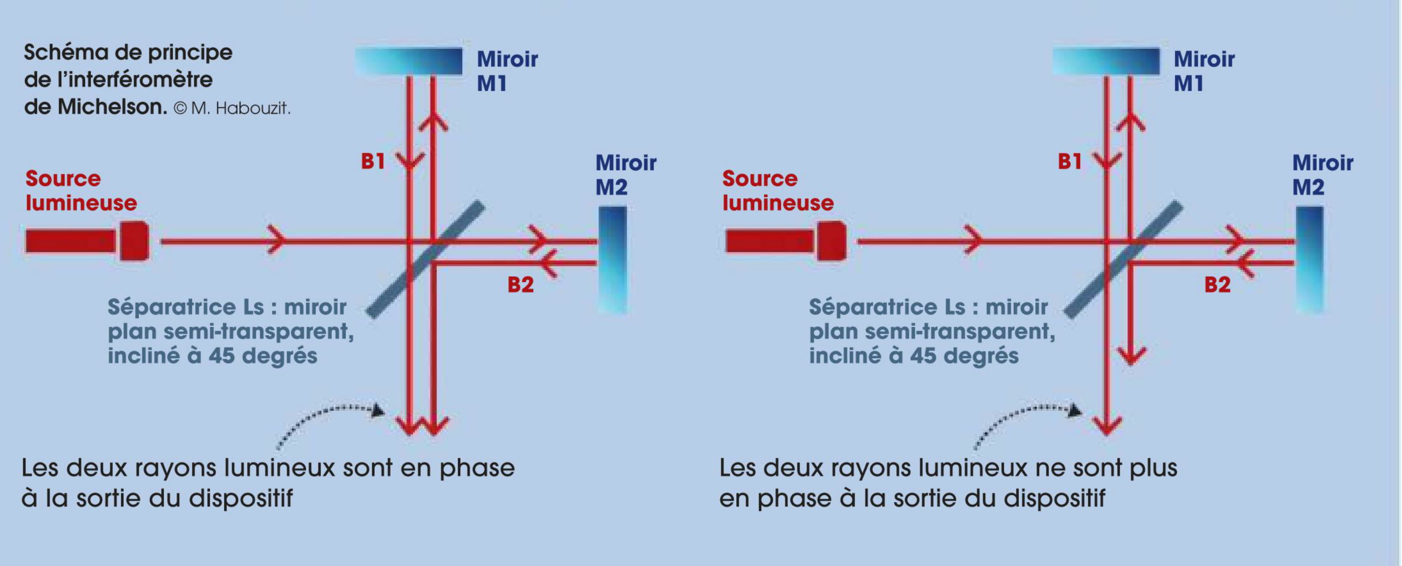


Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson. © M. Habouzit.

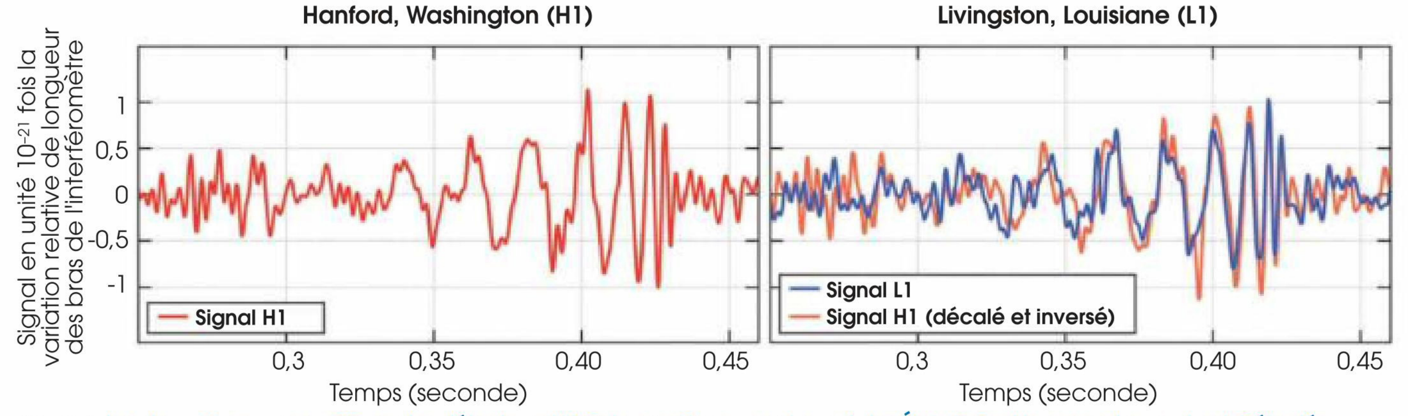


Figure 4. Les deux signaux recueillis par les détecteurs LIGO, le premier au nord-ouest des États-Unis et le second au sud-est. Détectés à 7 millisecondes d'intervalle, ils coïncident parfaitement (à droite, les signaux ont été superposés pour montrer leur excellente adéquation).



Concernant les ondes gravitationnelles détectées le 14 septembre 2015, en les comparant avec des modèles théoriques, les scientifiques ont attribué le signal à deux trous noirs orbitant l'un autour de l'autre, puis fusionnant pour n'en former qu'un seul. Puisque ces derniers sont très proches l'un de l'autre, les forces gravitationnelles mises en jeu sont colossales. Leur mouvement induit une perte d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles à mesure qu'ils se rapprochent l'un de l'autre : c'est le début du signal observé. L'amplitude va augmenter jusqu'à atteindre son maximum, lors de la fusion des deux trous noirs. L'analyse des signaux reçus a permis de déduire la masse des deux trous noirs : 36 masses solaires pour le premier et 29 pour le second. Les scientifiques estiment la masse du trou noir résultant de cette fusion à 62 masses solaires, c'est-à-dire que le système aurait perdu 3 masses solaires sous forme de rayonnement gravitationnel en émettant des ondes gravitationnelles (fig. 5).

Ce signal, de moins de 1 seconde, a permis une fois de plus de valider la théorie de la relativité générale, mais également de nous montrer, pour la première fois et en direct, la fusion de deux trous noirs stellaires ! Il a soulevé aussi de nouvelles interrogations dans la communauté scientifique. Les masses déduites des trous noirs sont très grandes comparées à celles des trous noirs stellaires déjà observés dans notre galaxie, la Voie lactée. Les trous noirs stellaires constituent la fin de vie des étoiles massives. Cependant, ceux de GW150914 sont très imposants (très massifs) et proviendraient donc d'étoiles l'étant également. Il y aurait peut-être une population d'étoiles très massives dans notre galaxie, quelque peu délaissée par les modèles actuels d'évolution stellaire.

QUE PEUT-ON DÉTECTER ?

Seuls des phénomènes très énergétiques et mettant en scène des objets très massifs peuvent induire l'émission d'ondes gravitationnelles détectables par les instruments. La coalescence de systèmes binaires en est un bon exemple : il peut s'agir de deux étoiles à neutrons tournant l'une autour de l'autre, mais aussi d'un trou noir et d'une étoile à neutrons, de systèmes binaires de trous noirs stellaires, ou encore de trous noirs supermassifs. Comme nous l'avons vu, l'amplitude et la fréquence du signal livrent des informations essentielles pour comprendre le système qui produit les ondes gravitationnelles. Chaque système émet des ondes de fréquence différente car cette dernière est inversement proportionnelle à la masse totale du système.

Les instruments tels que Virgo ou LIGO ne peuvent détecter que certaines fréquences ; cela dépend de la longueur de leur bras. Ainsi, les détecteurs terrestres sont assujettis aux événements de fréquence d'une centaine de hertz, par exemple des ondes gravitationnelles émises par un système de deux trous noirs stellaires ou de deux étoiles

Mélanie Habouzit

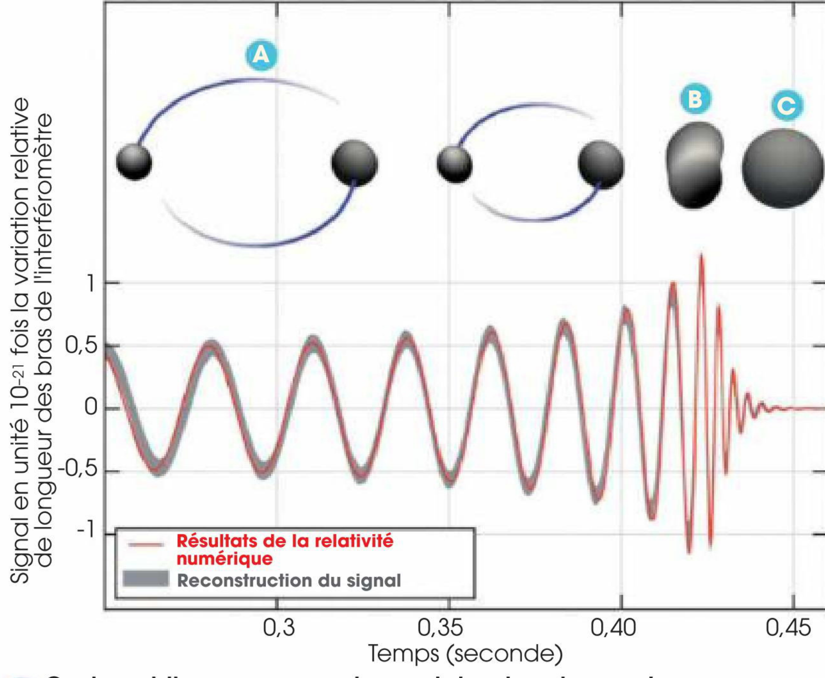
Mélanie Habouzit est doctorante à l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP). Après l'obtention de son Magistère de physique fondamentale à Orsay et de son Master d'astrophysique à l'Observatoire de Paris, elle a débuté sa thèse à l'IAP en 2013. Elle y étudie la formation des trous noirs supermassifs grâce à des simulations numériques reproduisant l'évolution de l'Univers.

à neutrons. Avec les nouvelles versions (comme celle de LIGO), nettement plus précises, un à cent systèmes d'étoiles à neutrons pourraient être détectés par an ! Les instruments pouvant être installés dans l'espace auraient des bras beaucoup plus longs et seraient sensibles à des fréquences nettement plus basses, de l'ordre du millihertz, pour détecter par exemple des systèmes de trous noirs supermassifs (plusieurs millions de fois la masse de notre Soleil) ! Les systèmes stellaires (étoile-étoile, étoile-trou noir stellaire ou deux trous noirs stellaires) ne sont visibles que pendant 1 minute environ (voire moins), alors que les systèmes plus massifs peuvent être détectables pendant plusieurs jours. Pour ces derniers, l'amplitude des ondes est aussi plus grande, des systèmes très éloignés de nous peuvent donc être détectés.

ALLER PLUS LOIN ?

L'Agence spatiale européenne s'attèle déjà à une mission d'envergure exceptionnelle : mettre en place dans l'espace, en orbite autour de la Terre, un détecteur de nouvelle génération d'ondes gravitationnelles, sous la forme de trois satellites qui s'enverront des rayons lasers (reprenant le même principe de détection que celui expliqué précédemment). Il s'agira de mesurer d'infimes déplacements des satellites les uns par rapport aux autres. Dans l'espace, ces derniers ne seront plus soumis au « bruit » parasite de la Terre (comme les ondes sismiques par exemple). Les scientifiques espèrent détecter ainsi des objets encore plus éloignés, dont le signal serait trop faible pour l'être depuis la Terre. Comme les ondes gravitationnelles interagissent très peu avec la matière, elles peuvent se propager sur de très grandes distances, un moyen formidable pour nous d'explorer le cosmos ! Ces signaux pourraient provenir de la fusion d'étoiles à neutrons ou encore d'étoiles agonisantes englouties par des trous noirs, mais également de trous noirs supermassifs.

La détection d'ondes gravitationnelles le 14 septembre 2015 valide une nouvelle méthode d'exploration du cosmos, « l'astronomie des ondes gravitationnelles » des débuts de l'Univers à nos jours, pour comprendre des objets physiques encore bien mystérieux comme les étoiles à neutrons ou les trous noirs supermassifs. C'est aussi un moyen d'observer, de sonder enfin les périodes très anciennes de l'histoire de l'Univers. **M. H.**



A Cycles orbitaux ou rapprochement des deux trous noirs avec des trajectoires en spirale ou phase spiralante

B Coalescence ou phase de fusion

C Trou noir unique – phase de relaxation

Figure 5. Modélisation du signal provenant de la fusion de deux trous noirs stellaires. La fréquence et l'amplitude du signal varient au cours du temps. Au début de la réception du signal, les trous noirs sont distants l'un de l'autre de plusieurs centaines de kilomètres, le signal a alors une fréquence de 35 hertz. Les deux trous noirs orbitent l'un autour de l'autre en se rapprochant et perdent de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Ils finissent par fusionner ; la fréquence du signal augmente jusqu'à plus d'une centaine de hertz.

Pour en savoir plus

Fadel K., « Genèse de la relativité… générale », *Découverte* n° 402, janvier-février 2016, p. 52-59.

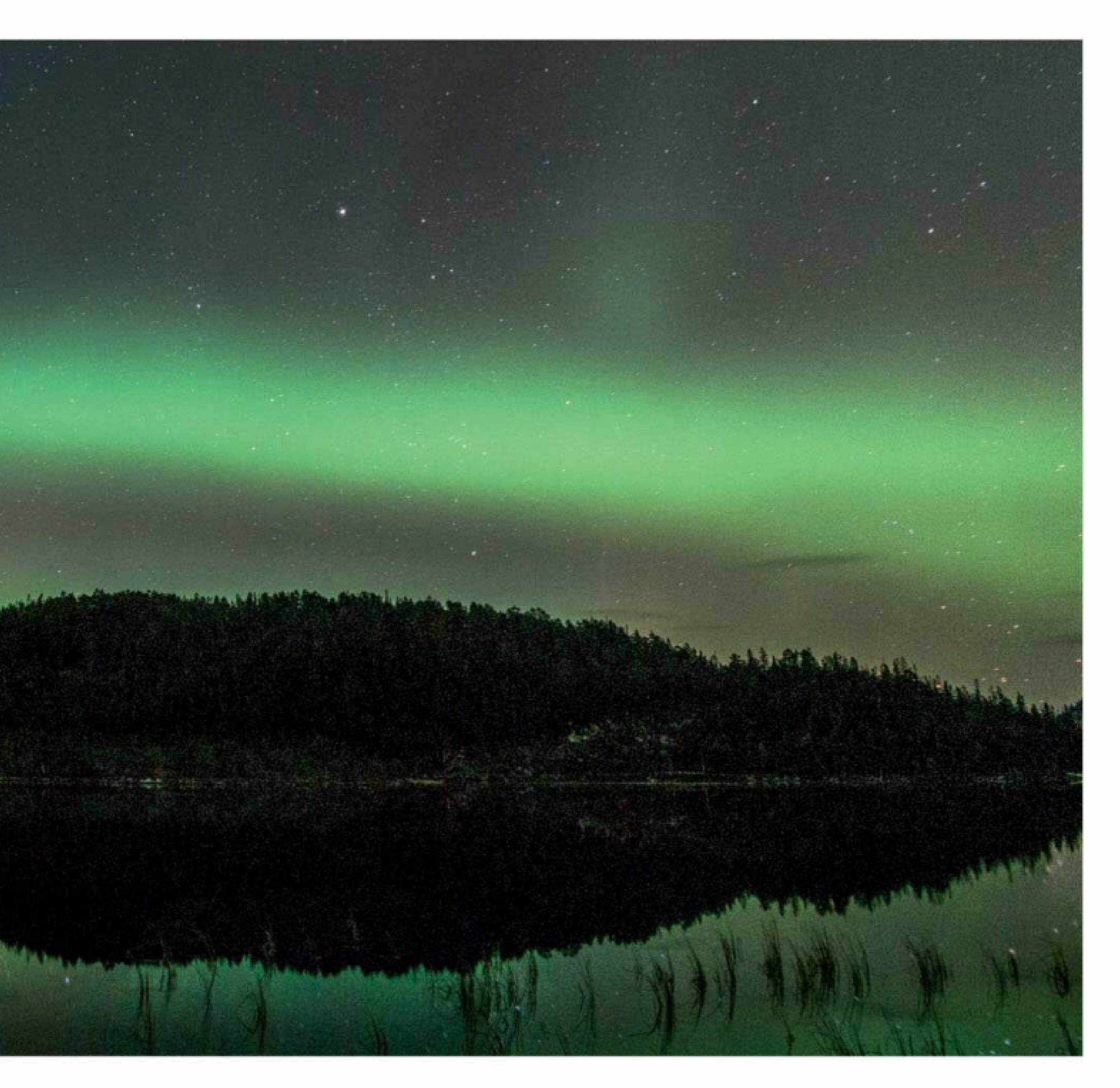
Habouzit M., « Les trous noirs, monstres massifs de l'Univers », *Découverte* n° 399, juillet-août 2015, p. 12-21.

Luminet J.-P., « Si ce n'est toi, c'est donc ton frère ? Le paradoxe des jumeaux », *Découverte* n° 379, mars-avril 2012, p. 22-31.


Aurore boréale au-dessus de Langvatna, en Norvège.
© H. Stokseth / Wikimedia Commons.

LES AURORES
Voyage du Soleil à la nuit

PAR **MARIELLE VERGÈS**, MÉDIATRICE SCIENTIFIQUE, UNITÉ PHYSIQUE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE



Les aurores boréales, dans l'hémisphère nord, et australes, dans l'hémisphère sud, sont dues à la précipitation quasi quotidienne de particules, principalement des électrons, dans l'atmosphère des régions polaires. Leurs couleurs et formes étaient présentées dans un précédent article (*Découverte* n° 404, mai-juin 2016, p. 20-29). Ce second volet porte sur le parcours des particules depuis le Soleil jusqu'à notre atmosphère, côté nuit.

Trois acteurs principaux sont en jeu dans le scénario des aurores. Tout d'abord, la source d'énergie, le Soleil, avec son champ magnétique et son vent solaire dont l'influence s'étend au-delà de Pluton, jusque 75 à 90 unités astronomiques[1], dans un domaine baptisé *héliosphère*. Ensuite, la Terre, dont l'influence magnétique couvre une zone plus petite, la *magnétosphère* (les dimensions sont données dans la légende de la figure 2b). Enfin, intervient la haute atmosphère terrestre, plus exactement l'*ionosphère*, qui fait office d'écran de projection pour les aurores (fig. 1).

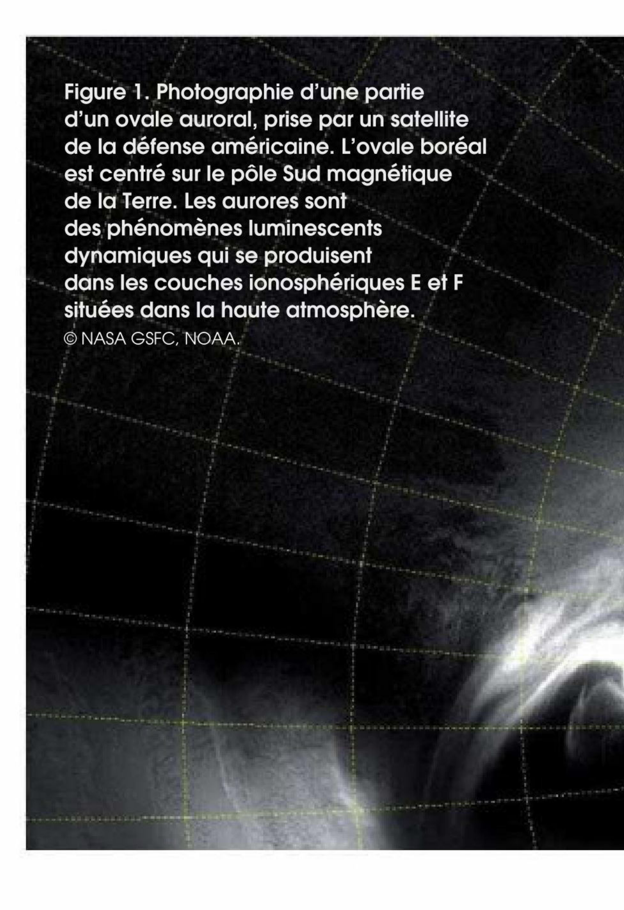


Figure 1. Photographie d'une partie d'un ovale auroral, prise par un satellite de la défense américaine. L'ovale boréal est centré sur le pôle Sud magnétique de la Terre. Les aurores sont des phénomènes luminescents dynamiques qui se produisent dans les couches ionosphériques E et F situées dans la haute atmosphère. © NASA GSFC, NOAA.

LE SCÉNARIO

Sous l'effet du vent solaire, le champ magnétique dipolaire (fig. 2a) de la Terre cède du terrain en amont (côté jour) et s'étire en aval à l'opposé du Soleil (côté nuit). Il forme néanmoins un paravent efficace autour de la Terre. Seule une faible proportion de particules (correspondant à 1 % de l'énergie du vent solaire) réussit à traverser la magnétopause, interface entre la magnétosphère et le vent solaire circulant dans la magnétogaine (fig. 2b). C'est ensuite 30 % de ce faible pourcentage de particules qui s'accumule au centre de la magnétosphère dans le plan équatorial, formant une *couche de plasma*. Cette zone se comporte comme un réservoir de particules susceptible de se vider symétriquement dans les régions boréale et australe de la Terre, au gré de reconfigurations magnétiques affectant la queue magnétosphérique. Ces événements, appelés *sous-orages magnétiques*, se produisent en moyenne toutes les six heures, jusqu'à dix fois par jour pendant les périodes d'activité intense du Soleil. À ne pas confondre avec les orages magnétiques qui ont lieu plus rarement, suite à l'arrivée massive de matière éjectée lors d'éruptions solaires par exemple. Dans ce cas, la proportion de particules transférées à la magnétosphère passe de 1 à 10 %, voire 20 %. Les orages magnétiques peuvent provoquer des sous-orages et donc des aurores.

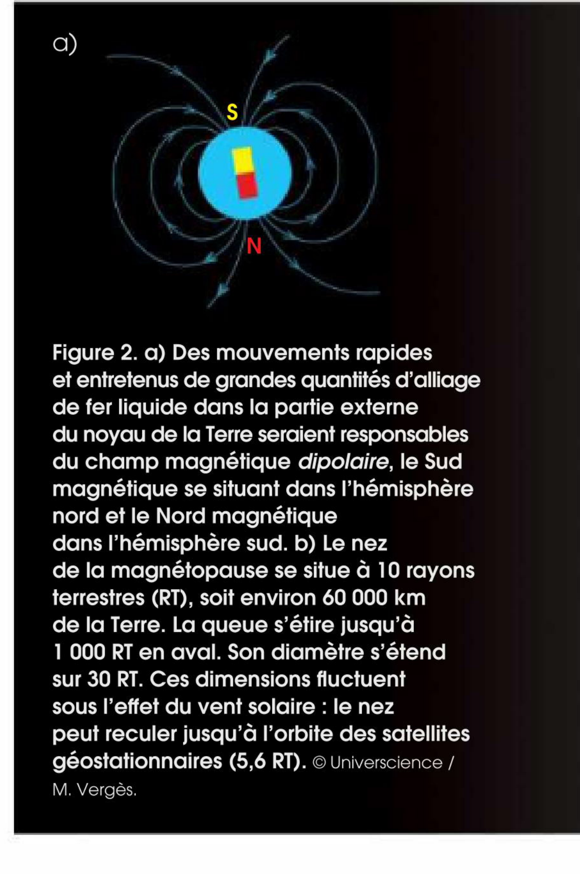


Figure 2. a) Des mouvements rapides et entretenus de grandes quantités d'alliage de fer liquide dans la partie externe du noyau de la Terre seraient responsables du champ magnétique *dipolaire*, le Sud magnétique se situant dans l'hémisphère nord et le Nord magnétique dans l'hémisphère sud. b) Le nez de la magnétopause se situe à 10 rayons terrestres (RT), soit environ 60 000 km de la Terre. La queue s'étire jusqu'à 1 000 RT en aval. Son diamètre s'étend sur 30 RT. Ces dimensions fluctuent sous l'effet du vent solaire : le nez peut reculer jusqu'à l'orbite des satellites géostationnaires (5,6 RT). © Universcience / M. Vergès.

(1) 1 unité astronomique (UA) = 149 597 870 700 mètres, soit 150 millions de kilomètres environ.

b)
Vent solaire
Onde de choc
Magnétogaine
Magnétopause
Lobe nord
Cornet polaire
Queue magnétosphérique
Terre côté jour
Terre côté nuit
Couche de plasma
Lobe sud
Magnétopause
Magnétogaine

LE SOLEIL, UN DRÔLE D'AIMANT

À l'instar du champ magnétique intrinsèque de la Terre, celui du Soleil proviendrait d'une dynamo autoentretenue(2). Si, en période d'activité solaire calme, il est possible de considérer qu'à grande échelle il présente la même forme dipolaire que celui de la Terre, il est cependant plus complexe et évolue bien plus rapidement au cours du temps. Il suit un cycle de 22 ans qui se compose de deux périodes de 11 ans. Au cours d'une période, le champ magnétique passe de la configuration dipolaire Nord/Sud à une configuration multipolaire résultant de l'accroissement de l'activité du Soleil, puis revient à une configuration dipolaire mais inversée (Sud/Nord). Le Soleil retrouve son champ Nord/Sud initial au terme de la période suivante.

LE SOUFFLE DU VENT

Eugene Parker prédit en 1958 que la couronne solaire, couche externe de l'atmosphère solaire chauffée en permanence à 1 million de degrés, est en expansion et atteint une vitesse supersonique(3) de l'ordre de 500 kilomètres par seconde. Dès lors, il était possible d'envisager qu'un flot de particules s'éloigne continuellement du Soleil : c'est le vent solaire. Il s'agit principalement d'électrons, de protons et de noyaux d'hélium. Cet état de la matière sans atomes ni molécules est un plasma. Dans le plasma du vent solaire, les collisions entre particules sont très rares et sa conductivité électrique est donc très grande. La modélisation de ce type de fluide électrisé soumis à un champ magnétique laisse entrevoir que ses particules subissent des forces magnétiques s'apparentant à des forces de pression. Une pression magnétique peut être calculée, comparable à la pression thermique du plasma (due à sa température). Si la pression thermique est plus grande que la pression magnétique, le plasma est « plus fort » que le champ magnétique. C'est le cas du plasma du vent solaire, qui emporte avec lui le champ magnétique du Soleil jusqu'aux confins de l'héliosphère. Ainsi transporté, le champ est renommé champ magnétique interplanétaire (CMI ; encadré *Le casque et la robe de ballerine*).

DÉFAUTS D'ÉTANCHÉITÉ

Pour expliquer les fluctuations temporelles du champ magnétique mesurées sur Terre et corrélées à l'activité du Soleil, James Dungey (1923-2015) suggère en 1961 l'importance du CMI. Il prévoit que la magnétopause devient perméable lorsque le CMI (plus précisément sa composante parallèle au champ magnétique terrestre) est orienté vers le sud. Dans ce cas, les lignes du CMI et celles du champ terrestre se connectent en des points de *reconnexion magnétique*. Ce mécanisme favorise le transfert des particules du vent solaire vers la magnétosphère (et inversement) et accélère les particules.

Le premier point de reconnexion se situe au nez de la magnétopause (fig. 3). Proche de ce point, la courbure des lignes nouvellement reconnectées est très prononcée. Or la courbure d'une ligne de champ magnétique est comparable à la compression (ou l'étirement) d'un ressort. Ainsi, une ligne de champ « pliée » a tendance à se déplier en libérant de l'énergie. Ici, la

(2) L'origine du champ magnétique solaire serait située à l'interface entre la partie interne du Soleil tournant sur elle-même d'un bloc et la zone convective qui tourne à des vitesses variables en profondeur et latitude.
(3) Le vent solaire est plus rapide que les ondes de pression dans le milieu dilué, mais très chaud (1 000 000 °C), qu'il constitue. Il est aussi plus rapide que les ondes magnétiques (ondes Alfvén), qui se déplacent respectivement à 60 et 40 km/s à 1 UA du Soleil.

Le casque et la robe de ballerine

Une modélisation de la couronne solaire en expansion à température constante, valable pour un Soleil calme, ainsi qu'une image de la couronne solaire rendent compte de la déformation du champ dipolaire due à l'expansion de la couronne solaire (fig. I et II), parfois en forme de casque pointu. En supposant que la déformation perdure le temps de la rotation du Soleil (27 jours pour un Terrien), on déduit que sur cette durée, la Terre se trouve au-dessus ou au-dessous du bord de l'équateur magnétique du Soleil, et donc baignée alternativement dans un champ magnétique orienté vers le Soleil ou en sens opposé (fig. III). Ainsi, pendant une rotation du Soleil sur lui-même, la Terre ne reçoit pas le même champ magnétique interplanétaire. Cela reste vrai pour des déformations plus réalistes ressemblant à une robe de ballerine qui tourne (fig. IV).

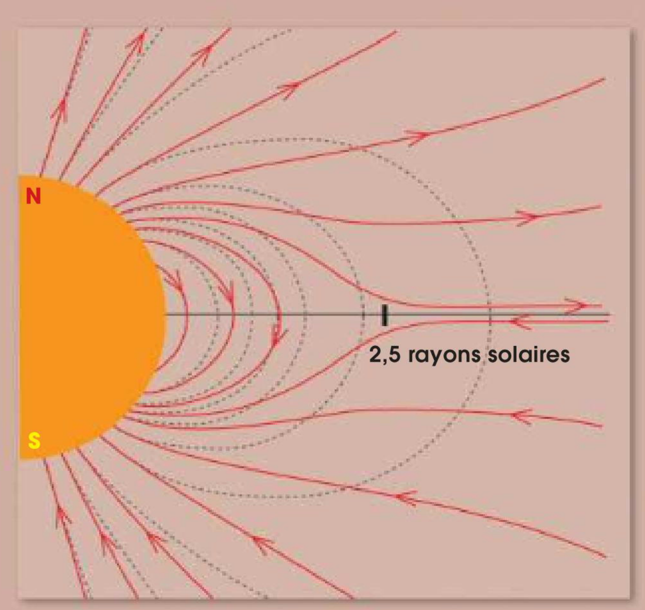
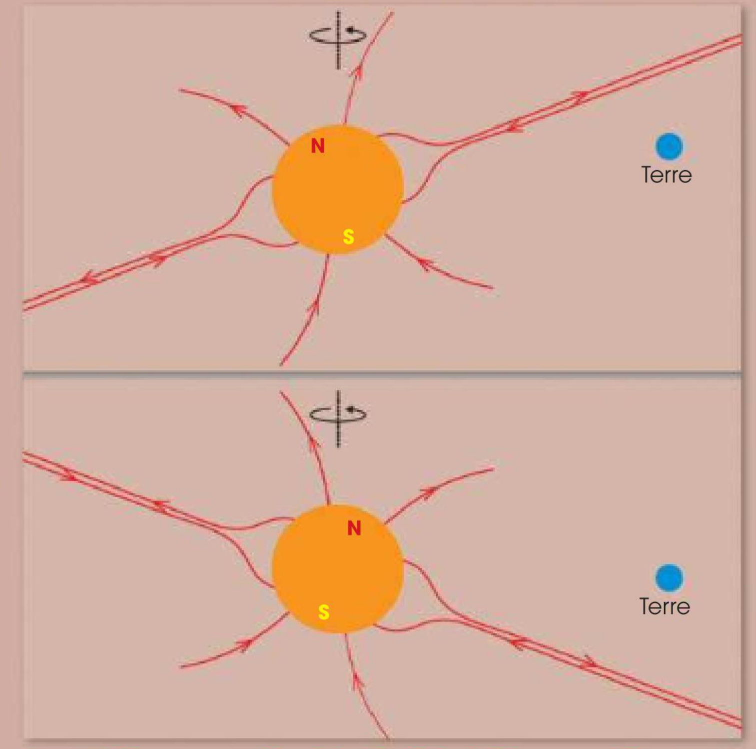


Figure I. En trait pointillé, champ magnétique dipolaire. En trait plein, champ magnétique déformé par l'expansion de la couronne. Aux plus basses latitudes, le plasma de la couronne est maintenu par les lignes de champ dont les deux extrémités sont situées sur le Soleil (lignes *fermées*). Les lignes *ouvertes* des plus hautes latitudes couvrent tout l'espace à partir de 2,5 rayons solaires. Elles représentent le champ magnétique interplanétaire. © Universcience / M. Vergès, d'après Pneuman et Kopp (1971).



[redacted] **Nord/Sud est incliné par rapport à l'axe de rotation du Soleil sur lui-même, contrairement à la figure I.** © Universcience / M. Vergès.

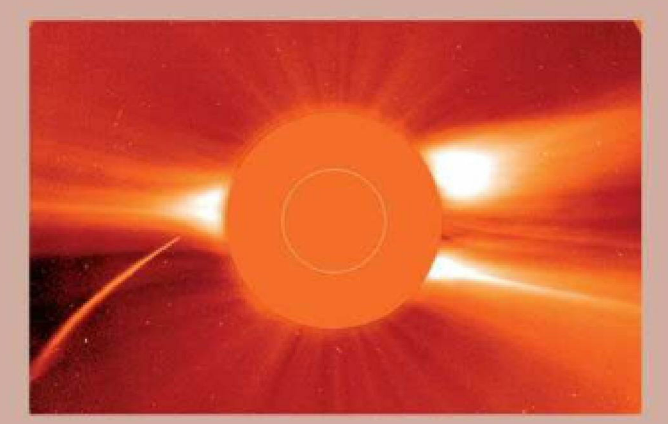
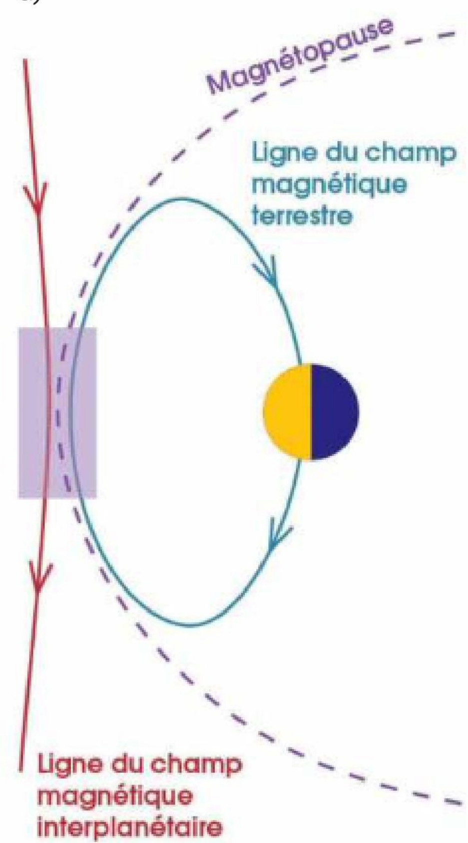


Figure II. Lors d'une éclipse naturelle ou réalisée artificiellement à l'aide d'un masque placé devant un télescope, la lumière issue de la photosphère diffusée par les électrons et les poussières de la couronne externe peut révéler des structures en forme de casque pointu. © SOHO / LASCO (ESA & NASA).



Figure IV. La *robe de ballerine* représentant l'équateur magnétique du Soleil bouge au cours du temps. © H. Weill / NASA.



b)

Magnétopause

Figure 3. Reconnexion magnétique au nez de la magnétosphère. a) Les lignes du champ magnétique interplanétaire et du champ terrestre sont non connectées, orientées en sens opposés et très rapprochées : la variation du champ magnétique est très forte dans la zone violette (fort gradient de champ magnétique). b) Les lignes se sont reconnectées autrement. Les particules du vent solaire (points rouges) et celles de la magnétosphère (points bleus) sont mélangées. La courbure très prononcée des lignes reconnectées est une source d'accélération des particules vers les pôles. Une partie du trajet de ces dernières dans la magnétosphère est représentée par la flèche orange.

reconnexion accélère les particules vers les pôles. On pourrait s'attendre à ce qu'elles entrent en masse dans l'ionosphère par les cornets polaires (fig. 2b) et provoquent de belles aurores. Cependant, à l'approche des pôles, elles subissent une répulsion due à l'augmentation du champ magnétique. Elles ne peuvent descendre plus bas qu'une certaine altitude appelée *point miroir*, lequel dépend de l'angle d'attaque des particules (encadré *Miroir magnétique*). Celles dont le point miroir est suffisamment bas sont précipitées dans l'ionosphère et peuvent éventuellement l'allumer, déclenchant des aurores diffuses… côté jour. Ces aurores, que l'on verrait rougeâtres, ne sont pas visibles depuis la Terre mais sont détectées par des sondes. Quant aux particules qui ont été repoussées par les pôles, elles sont entraînées en aval dans les lobes, où elles se mélangent à d'autres issues de reconnexions magnétiques sur les flancs de la magnétopause.

Miroir magnétique

En l'absence de champ électrique et moyennant certaines approximations, on montre qu'une particule se dirigeant vers les pôles magnétiques (où le champ magnétique est de plus en plus intense et les lignes de champ convergent) subit une force de répulsion magnétique, tout en conservant son énergie cinétique totale. Cette dernière dépend des deux composantes de la vitesse de la particule, l'une parallèle et l'autre perpendiculaire aux lignes de champ magnétique. À l'approche des pôles, la vitesse perpendiculaire augmente tandis que la vitesse parallèle diminue. Cette dernière s'annule en un *point miroir*, où la particule rebrousse chemin sous l'effet de la force de répulsion. L'altitude du point miroir dépend de l'angle initial entre la vitesse de la particule et le champ magnétique terrestre (angle d'attaque). Avec une vitesse initiale presque parallèle au champ magnétique, l'angle d'attaque est quasi nul et la particule descend suffisamment bas : elle est précipitée dans l'atmosphère.

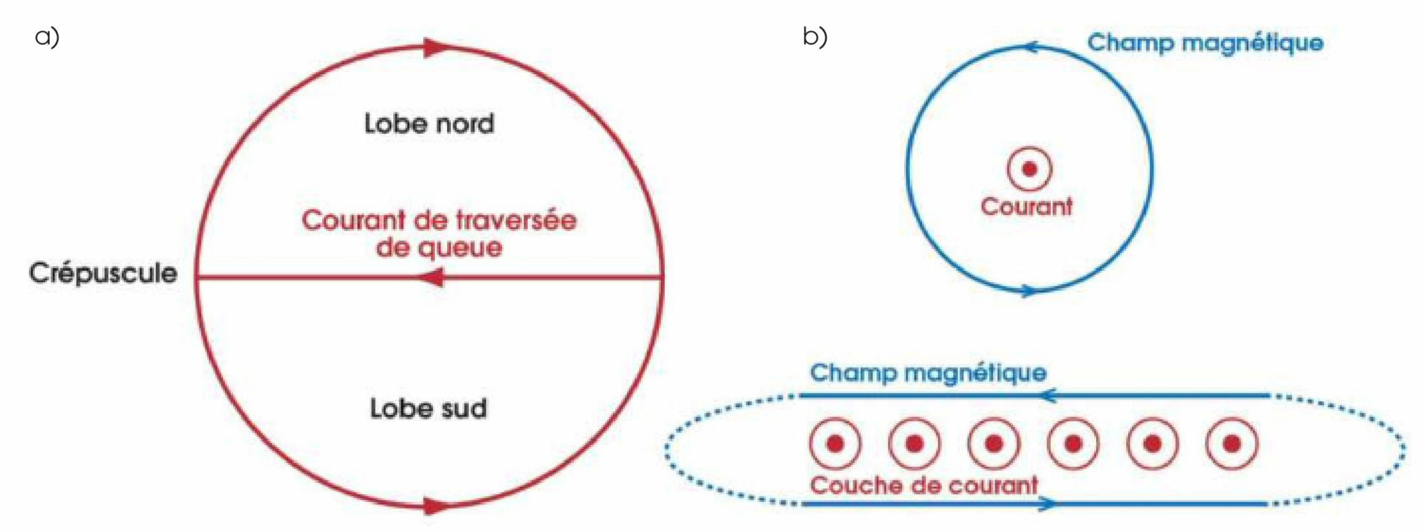


Figure 4. Coupe de la queue magnétosphérique. a) Le courant de traversée de queue effectue une boucle sur lui-même, en passant par les lobes nord et sud, constituant ainsi la couche de courant de la magnétopause autour des lobes. b) Un fil est parcouru par un courant électrique (perpendiculaire au dessin). Le champ magnétique autour du courant est figuré par une ligne circulaire dont le sens est dicté par le théorème d'Ampère. De même, une couche de courant électrique doit exister entre deux lignes de champ magnétique de sens opposés. © Universcience / M. Vergès.

IONOSPHÈRE ET MAGNÉTOSPHÈRE CONNECTÉES

Les particules d'origine solaire se retrouvent dans la couche de plasma. Cette dernière est le siège d'un courant électrique traversant la queue magnétosphérique du côté aube vers le côté crépuscule (fig. 4a). Ce courant peut être justifié en remarquant que la couche de plasma se trouve entre des lignes de champ magnétique orientées en sens opposés (fig. 4b). Lors de la phase de croissance du sous-orage (1 à 2 heures), la couche de plasma s'allonge et s'affine (son épaisseur passe de 30 000 kilomètres environ jusque 500 à 1 000). Le courant s'intensifie et les lignes de champ magnétique s'étirent.
Pendant ce temps, les belles aurores se font attendre dans l'ionosphère. Arrive la phase du déclenchement au cours de laquelle le courant s'interrompt. Il emprunte un trajet devenu plus facile à travers l'ionosphère où il descend le long d'une ligne de champ, fait un petit bout de chemin à l'horizontale dans l'ovale auroral, puis remonte par une autre ligne, tandis que des arcs auroraux s'allument aux latitudes les plus basses. Pendant la phase d'expansion, les arcs se déforment et peuvent apparaître de plus en plus vers le nord (vers le sud pour les aurores australes). Vient ensuite la phase de recouvrement (1 à 2 heures) : les aurores s'éteignent progressivement alors que la couche de plasma reprend sa forme « standard ».
La progression des aurores vers les pôles est un point fort des modèles qui attribuent le déclenchement des sous-orages à une interruption de courant proche de la Terre (8 à 12 RT(4)) (fig. 5). L'interruption est à l'origine d'une reconnexion magnétique observée quelques instants plus tard entre 20 et 30 RT. D'autres modèles proposent une chronologie inversée où la reconnexion magnétique précède l'interruption de courant.

PREMIÈRE ACCÉLÉRATION

Ce sont les électrons descendant dans l'ionosphère qui provoquent les belles aurores brillantes (qualifiées de discrètes) ou les aurores diffuses. Avant d'arriver dans les zones aurorales, les électrons ont suivi des lignes de champ

(4) 1 rayon terrestre moyen (RT) = 6 371 km.



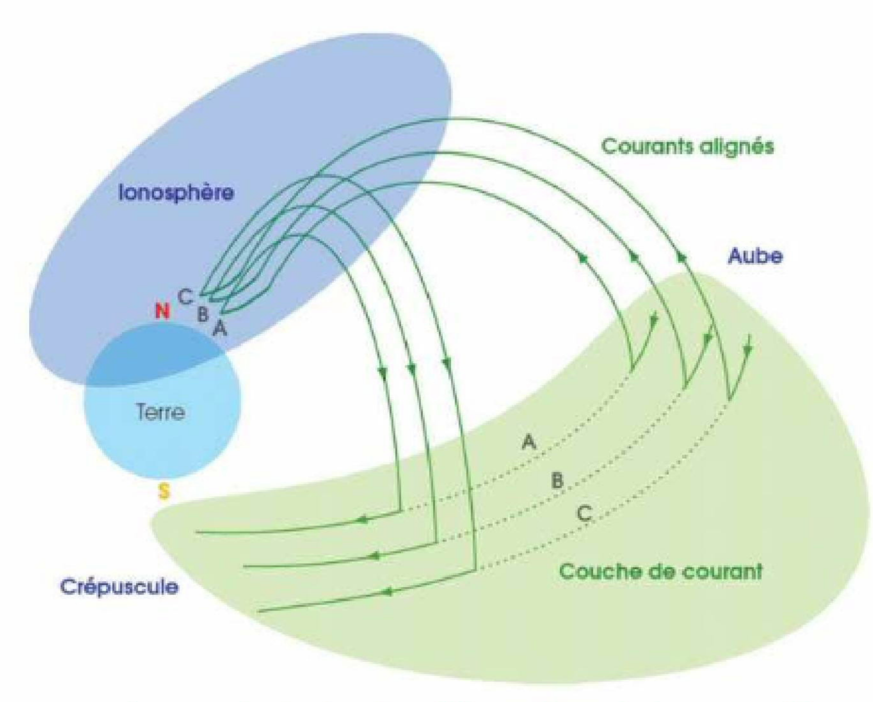


Figure 5. Les courants *alignés* sont parallèles aux lignes de champ magnétique. Ils connectent l'ionosphère à la couche de plasma située dans la queue magnétosphérique. La progression des aurores vers le nord (de A vers C) peut s'expliquer par celle de l'interruption du courant vers l'arrière de la queue magnétosphérique. D'autres courants alignés symétriques circulent dans l'hémisphère sud. © Universcience / M. Vergès, d'après Clauer et McPherron.

Marielle Vergès

Marielle Vergès, ingénieure diplômée du Conservatoire national des arts et métiers et de l'université du Maine, est médiatrice scientifique dans l'unité Physique du Palais de la découverte depuis 1991. Elle anime notamment des exposés en salle « Lumière ».

magnétique particulières retrouvées dans la couche de plasma. L'accélération des électrons et d'autres particules provient de l'énergie magnétique préalablement emmagasinée dans les lignes de champ très étirées avant le déclenchement. Une partie des électrons (et autres particules) est accélérée vers la Terre. Les électrons peuvent revenir ainsi vers l'ionosphère du côté nuit, avec une énergie multipliée par cinq environ. Une fois l'énergie libérée, le champ magnétique reprend sa forme dipolaire : c'est la dipolarisation (fig. 6). Les missions multisatellitaires Cluster de l'Agence spatiale européenne (ESA) et THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms ; mission conjointe de la NASA – National Aeronautics and Space Administration – et de l'ESA) détectent des dipolarisations qui se succèdent en s'éloignant de la Terre à des centaines de kilomètres par seconde. Ce sens de progression est en accord avec celui des arcs auroraux vers le nord. D'autres dipolarisations progressent en sens inverse depuis le point de reconnexion vers la Terre. Elles sont en accord avec l'extension vers l'équateur de la frontière sud de l'ovale auroral.

SECONDE ACCÉLÉRATION

Cependant, l'accélération due à la dipolarisation n'est pas suffisante. Une autre accélération est mesurée plus près de la Terre, entre 2 000 et 20 000 kilomètres d'altitude. Elle élève l'énergie des électrons à 10 kiloélectronvolts, valeur typique requise pour des aurores brillantes (discrètes). Cette accélération est à l'origine d'un rayonnement électromagnétique aux longueurs d'onde kilométriques de 300 kilohertz (kHz), découvert par des satellites au-dessus de l'ionosphère en 1965 et qui correspond à 1 % environ de l'énergie cinétique des électrons accélérés.

Cette seconde accélération est inattendue puisque le miroir magnétique freine le flot d'électrons, au point de leur faire rebrousser chemin. Seuls ceux dont le point miroir est suffisamment bas peuvent porter le courant dans l'ionosphère. Mais au fur et à mesure de la descente, il y en a de moins en moins ! Comment justifier alors un courant suffisant pour expliquer les aurores ? Les mesures *in situ* montrent que le courant dans l'ionosphère est imposé de façon continue, probablement par des mécanismes mis en jeu lors de l'interruption du courant de traversée de queue. Ce forçage du courant est l'une des clés du mystère. En effet, l'intensité du courant étant proportionnelle au nombre de charges électriques qui circulent et à leur vitesse, on déduit que les électrons réussissant à descendre de plus en plus bas doivent aller de plus en plus vite puisqu'ils sont de moins en moins nombreux. Cette accélération correspond à l'effet d'un champ électrique (ou d'une différence de potentiel électrique) sur les électrons, parallèle aux lignes de

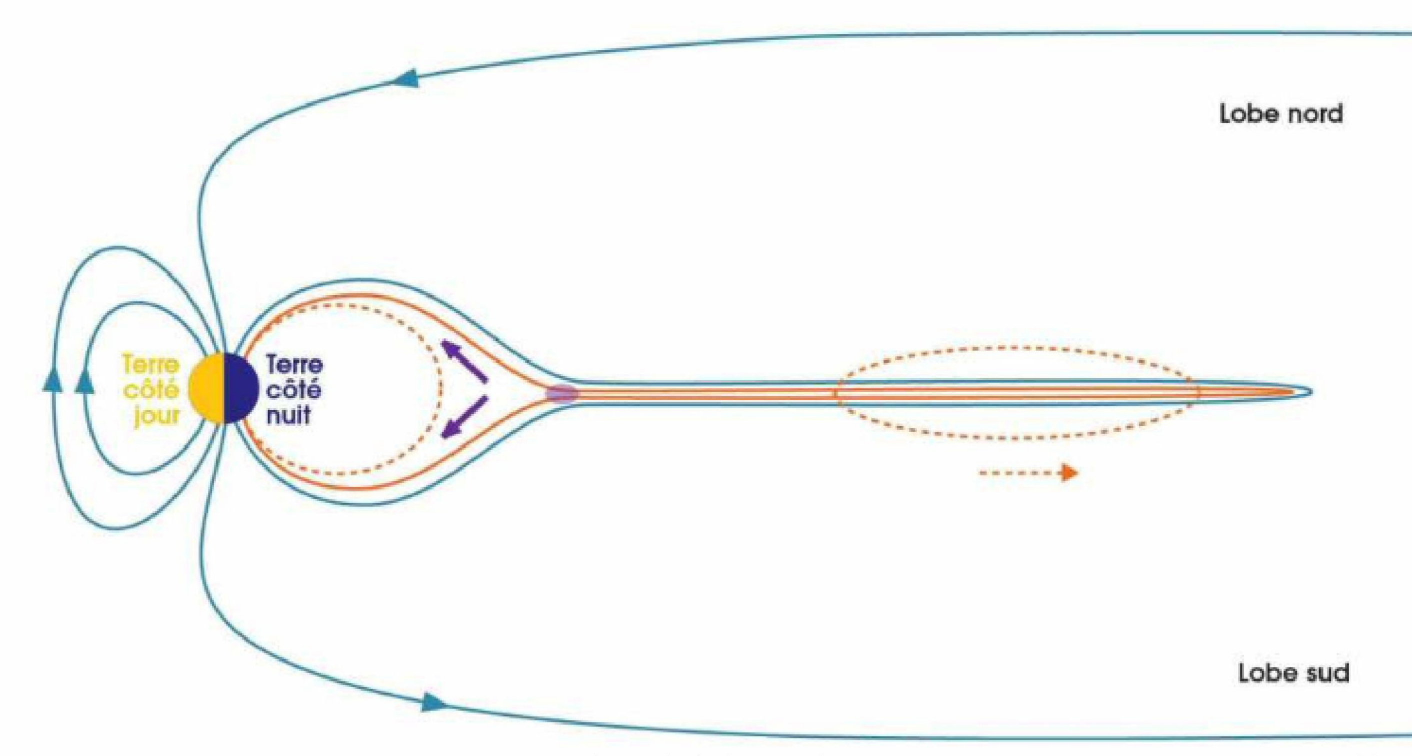


Figure 6. En trait plein orange, une ligne de champ magnétique très étirée est le siège d'une interruption de courant (ovale violet) qui accélère le plasma vers les pôles (flèches violettes) et modifie la topologie de la ligne (pointillé orange). La ligne est plus arrondie côté Terre (dipolarisation). Une reconnexion magnétique forme et éjecte un plasmoïde (boucle de champ magnétique contenant du plasma), qui rejoint le vent solaire aux confins de la magnétosphère. Le phénomène se répète sur la ligne bleue et d'autres non dessinées. © Universcience / M. Vergès.

champ magnétique. Dans les années 1970, Stephen Knight établit une formule qui en donne la valeur en fonction du courant imposé. Les mesures indiquent plusieurs sauts de potentiel successifs de quelques kilovolts.

Un autre mécanisme d'accélération implique des ondes *Alfvén*, qui tordent les lignes de champ magnétique baignant les plasmas. Certains modèles reposent sur des résonances de ces ondes (l'équivalent des résonances dans les tuyaux sonores). Selon la taille des cavités résonantes, les longueurs d'onde, et donc les fréquences, ne sont pas du même ordre. Celles de 1 hertz expliqueraient le vacillement des aurores. D'autres modèles font intervenir des ondes non résonantes plus rapides que les particules, de l'ordre de 10 à 100 hertz, dont les longueurs d'onde sont assez grandes pour permettre une interaction avec les électrons pendant quelques millisecondes, ce qui est suffisant pour une accélération efficace. Elles expliqueraient la turbulence du champ électrique constatée lors de mesures en haute définition temporelle et les structures fines des aurores (filaments lumineux larges de 100 mètres).

Les mécanismes accélérateurs de la zone d'accélération aurorale sont relativement bien compris aujourd'hui, mais le forçage du courant dans l'ionosphère et l'origine de son interruption dans la queue magnétosphérique restent à élucider. Après Cluster et THEMIS, la mission MMS (Magnetospheric Multiscale Mission) de la NASA, lancée en mars 2015, permettra d'en savoir davantage. **M. V.**

En salle « Lumière », nos visiteurs peuvent assister à l'exposé « Aurores polaires » à l'aide d'une expérience simulant les aurores, la Planeterrella.

Pour en savoir plus :
http://www.palais-decouverte.fr/fr/au-programme/expositions-permanentes/toutes-les-salles/salles-de-physique/les-exposes/

Remerciements
L'auteure remercie Fabrice Mottez et Laurent Lamy de l'Observatoire de Paris.

HYPNOSE
Aux frontières de l'inconscient

Si je vous dis « hypnose », quel mot vous vient à l'esprit ? Charlatanisme ? Manipulation mentale ? Danger ? Spectacle ? Scepticisme ? Thérapie ? Peut-être tous à la fois… Car si l'hypnose souffre aujourd'hui encore de préjugés hérités de sa longue histoire, sa pratique et son usage sont de plus en plus répandus. Puissant outil thérapeutique, elle pourrait bien nous révéler également les mécanismes de notre conscience…

PAR **AURÉLIE MASSAUX**, MÉDIATRICE SCIENTIFIQUE, UNITÉ SCIENCES DE LA VIE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Avez-vous déjà vécu une séance d'hypnose ? Voici comment s'est déroulée ma toute première… Joyce Rives et Gwenael Le Bihan m'accueillent avec le sourire dans leur cabinet de Larmor-Plage. Tous deux sont praticiens en hypnothérapie, diplômés de l'École centrale d'hypnose de Paris (ECH) et parmi les rares à pratiquer à deux. Ils m'invitent à passer au « salon ». Confortablement installés dans des fauteuils, une longue discussion commence, de près de une heure. Je leur expose les raisons de ma venue : expérimenter l'hypnose pour mieux la décrire aux lecteurs de *Découverte*. Ils me questionnent sur ce que je souhaiterais voir évoluer en moi, ce qui m'entrave parfois dans ma vie personnelle et professionnelle. De manière informelle, je livre à ces deux personnes à qui je fais confiance des volets intimes de ma personnalité. Nous décidons ensemble du thème à travailler lors de cette séance. Cette anamnèse[1] terminée, nous pénétrons dans « l'espace thérapie », où trône un grand fauteuil.

Je me retrouve allongée sur ce fauteuil, respirant[2] comme un nouveau-né qui voit le jour pour la première fois. Joyce mènera la séance, assistée de Gwenael. Elle me demande de me relaxer, me concentrer sur un lieu qui m'évoque calme et apaisement. Je choisis de fermer les yeux et me laisse aller à écouter sa voix – douce, posée, mélodieuse – qui m'entraîne avec elle. Derrière mes paupières closes, je voyage en volant : je survole la mer, contemple des paysages, traverse des nuages. Je me sens bien, détendue, sereine. Je sais que je ne dors pas, je suis consciente de ceux qui m'entourent : j'entends les mots de Joyce et la respiration de Gwenael, focalisée sur ces mots répétés à plusieurs reprises, la même phrase, comme un leitmotiv rassurant. Je sens mon corps s'alourdir, j'ai des soubresauts dans mes doigts, mon bras tombe le long du fauteuil mais cela ne me gêne pas. Je ne me rends pas compte du temps qui passe, je suis bien. Par ses paroles, Joyce me rappelle petit à petit à elle. Je quitte mon voyage intérieur pour revenir à l'instant présent. J'ouvre les yeux, regarde Joyce et Gwenael qui me sourient. Une heure vient de passer.

Je ne sais trop quoi penser de ce moment, incapable de dire si quelque chose en moi a été changé. Une chose est sûre, je me sens apaisée. Suis-je réceptive à l'hypnose ? Joyce et Gwenael l'affirment. Comme de nombreuses autres personnes, j'ai présenté tous les signes d'une transe hypnotique : sensation de bien-être, calme, absence de fatigue, détente musculaire, cillements des paupières, contractions musculaires involontaires, respiration et déglutition modifiées, ainsi que perceptions sensorielles accrues. Je suis partie… mais où ?

LE POIDS DE L'HISTOIRE

Ce que je viens de vivre ne ressemble en rien à l'image que j'avais de l'hypnose. Pas de « dormez, je le veux ! », de spirale ou pendule à fixer, de claquements de doigts et bruitages gutturaux comme le fait

(1) Terme utilisé par les thérapeutes pour désigner ce moment d'échanges où le patient raconte son histoire liée à sa problématique.
(2) La respiration abdominale est utilisée dans nombre de techniques de relaxation. Il s'agit d'inspirer en gonflant son ventre, et non ses poumons, et d'expirer en le rentrant, tout cela sans bouger sa poitrine.



© reznik_val / fotolia.com.

Messmer, le fascinateur[3] ; je n'ai pas imité une poule comme certains participants d'émissions télévisuelles… Je suis bien loin de ces clichés sur l'hypnose : ce ne serait que de la comédie et des mises en scène théâtrales, on pourrait perdre le contrôle de sa volonté et devenir le pantin d'autrui…

(3) Messmer est un artiste hypnotiseur québécois se produisant sur scène et participant à de nombreuses émissions télévisuelles au Canada et en France.

Pas étonnant que de telles idées circulent sur l'hypnose, au vu de l'histoire sulfureuse qui l'entoure (encadré *La longue histoire de l'hypnose* en fin d'article). En France, elle fut condamnée de nombreuses fois par l'Académie de médecine. Jean-Martin Charcot (1825-1893) lui assènera le coup de grâce en la cantonnant au traitement des personnes hystériques. Ce dogme éloignera l'hypnose des pratiques médicales et sujets de

Applications de l'hypnose

Psychologie et psychiatrie

Psycho-traumatologie et victimologie

Troubles du comportement alimentaire

Addictions

Troubles chez l'enfant

Troubles psycho-somatiques

Sexologie

Neurologie

Pneumologie et oto-rhino-laryngologie

Gastroentérologie

Cardiologie

Gynécologie et obstétrique

Dermatologie

Soins dentaires

Douleurs aiguës ou chroniques

Soins palliatifs et accompagnement de malades

Chirurgie, examens médicaux et anesthésie

Domaine sportif

Domaine préventif

Figure 1. Les différentes applications de l'hypnose.
© Universcience / A. Massaux d'après le rapport de l'INSERM, « Évaluation de l'efficacité de la pratique de l'hypnose », juin 2015.

recherche pendant des années, du moins en France. Car outre-Manche, outre-Atlantique et au-delà de l'Oural, le développement de l'hypnose ne s'est pas tari à la fin du XIXe siècle, mais a connu au contraire un essor important, notamment dans la seconde moitié du XXe siècle.

LES PREUVES DE SON EFFICACITÉ

Cet essor a permis de lever petit à petit le voile de peur et d'incompréhension qui entourait l'hypnose. Bien sûr, elle est toujours une recette à succès dans le milieu du spectacle(4), mais son utilisation est de plus en plus répandue dans les domaines de la santé et du développement personnel.

Le terme « hypnose » regroupe diverses pratiques à visée médicale : hypnosédation, utilisée en anesthésie, hypnoanalgésie, indiquée dans la prise en charge de la douleur, ou hypnothérapie, à but psychothérapeutique (fig. 1).

Il existe des preuves de son efficacité, comme le soulignent les rapports de l'Académie de médecine de 2013 et de l'INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale) de 2015. Cependant, les auteurs mentionnent le manque de données médicales pour conclure sur l'utilité de l'hypnose dans l'ensemble de ses applications. Ils précisent aussi le besoin de recourir à des analyses qualitatives pour évaluer réellement son efficacité, ce

(4) Un nouveau phénomène de mode colonise d'ailleurs la France depuis quelques années, l'hypnose de rue. Des personnes formées sur Internet, ou lors de stages-éclair, se proposent de vous hypnotiser en quelques instants, dans la rue, simplement pour s'amuser.

Quel statut pour l'hypnose en France ?

Aucun cadre légal ne réglemente la pratique de l'hypnose ou son parcours de formation. Pourtant, elle occupe une place importante dans de nombreux cabinets privés et en milieu hospitalier. En 2015, il existait une douzaine de formations universitaires à l'hypnose, ouvertes aux professionnels de la santé, mais non reconnues à ce jour par le Conseil national de l'Ordre des médecins. S'y ajoutent de nombreuses formations associatives et privées, certaines d'entre elles réservées aux professions médicales et/ou de santé, d'autres accessibles à un public plus large. Elles sont parfois labellisées « hypnose thérapeutique ». Rappelons que s'il n'y a pas de texte légal interdisant la dispense de ces formations à des non-professionnels de santé, la pratique de l'hypnose à visée thérapeutique par des non-médecins a déjà fait l'objet en revanche de condamnations pour exercice illégal de la médecine. Le statut d'hypnothérapeute, non réglementé, concerne ainsi des praticiens aux qualifications fort différentes.

Dès lors, en tant que patient, comment faire confiance à un praticien en hypnose et oser lui confier son esprit ? D'autant plus que des faits peu louables, mais rares, entachent l'hypnose : fabrication de faux souvenirs de traumatismes et d'abus sexuels dans l'enfance, viols, manipulations psychologiques… Face aux risques éthico-juridiques et psychologiques, les associations de praticiens en hypnose exigent de leurs membres le respect d'un code de déontologie et/ou d'une charte éthique. Certaines écoles destinées aux non-professionnels de santé imposent à leurs élèves de suivre un enseignement de psychologie pour parfaire leur qualification (c'est le cas de l'ECH, partenaire de l'EEPSSA, École européenne de psychothérapie socio- et somato-analytique). De plus, ces organismes recommandent de s'adresser en priorité à un professionnel de santé, déjà porteur d'une éthique médicale. Ils militent également pour la reconnaissance de l'hypnose au niveau législatif.

que font déjà nombre d'études en sciences humaines. Citons également les multiples travaux de l'école de Palo Alto (courant de pensée en psychologie d'origine californienne) qui démontrent le pouvoir de l'hypnose associée aux thérapies brèves. Si l'hypnose semble être efficace dans de nombreux cas, la Haute Autorité de santé la recommande pourtant pour une seule application : la prise en charge de la douleur aiguë en ambulatoire chez l'enfant de 1 mois à 15 ans. Pourquoi ? Serait-elle dangereuse ? Les spécialistes s'accordent à dire que l'hypnose pratiquée par un professionnel de santé formé à cette discipline est sûre. Quelques effets secondaires ont été répertoriés (maux de tête, somnolence, vertiges, anxiété, faux souvenirs), mais demeurent rares. De plus, s'adresser à des professionnels est gage de sérieux car ils connaissent les outils de l'hypnose et savent reconnaître les pathologies psychiatriques pour lesquelles l'hypnose est fortement déconseillée. L'hypnose souffrirait-elle alors de l'absence de cadre légal (encadré *Quel statut pour l'hypnose en France ?*) ? Il est certain en tout cas que l'on tourne en rond : sans reconnaissance officielle, la recherche sur l'hypnose ne pourra bénéficier de fonds pour évaluer sa pertinence, et sans preuves concrètes de son efficacité, elle ne pourra bénéficier d'une reconnaissance officielle…

L'HYPNOSE, UN ÉTAT DE CONSCIENCE MODIFIÉ

Un cadre législatif entourant la pratique de l'hypnose est véritablement indispensable, puisqu'elle touche à l'esprit, plus précisément à notre conscience. L'hypnose peut se définir en effet comme « un état modifié élargi de conscience » : il a été prouvé que ce n'est pas du sommeil, du coma ou de la méditation (fig. 2). Une personne est éveillée et consciente sous hypnose, dans un état de *conscience hypnotique*, aussi appelé *transe hypnotique*. En effet, à l'état normal, notre attention se porte constamment d'une information à une autre, afin de pouvoir s'adapter en permanence à notre environnement. Dans cet état de conscience, nous sommes capables de juger, analyser, agir : on parle de *conscience critique*. Certains facteurs peuvent influencer notre état de conscience – ennui, stress, anxiété, plaisir,

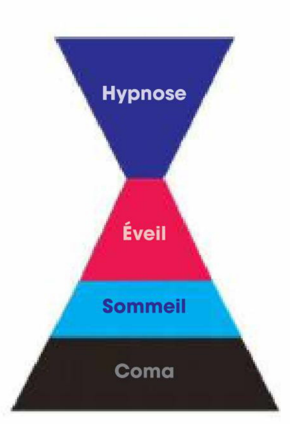


Figure 2. Les différents états de vigilance. L'hypnose serait potentiellement un état de conscience élargi. © Universcience / A. Massaux.

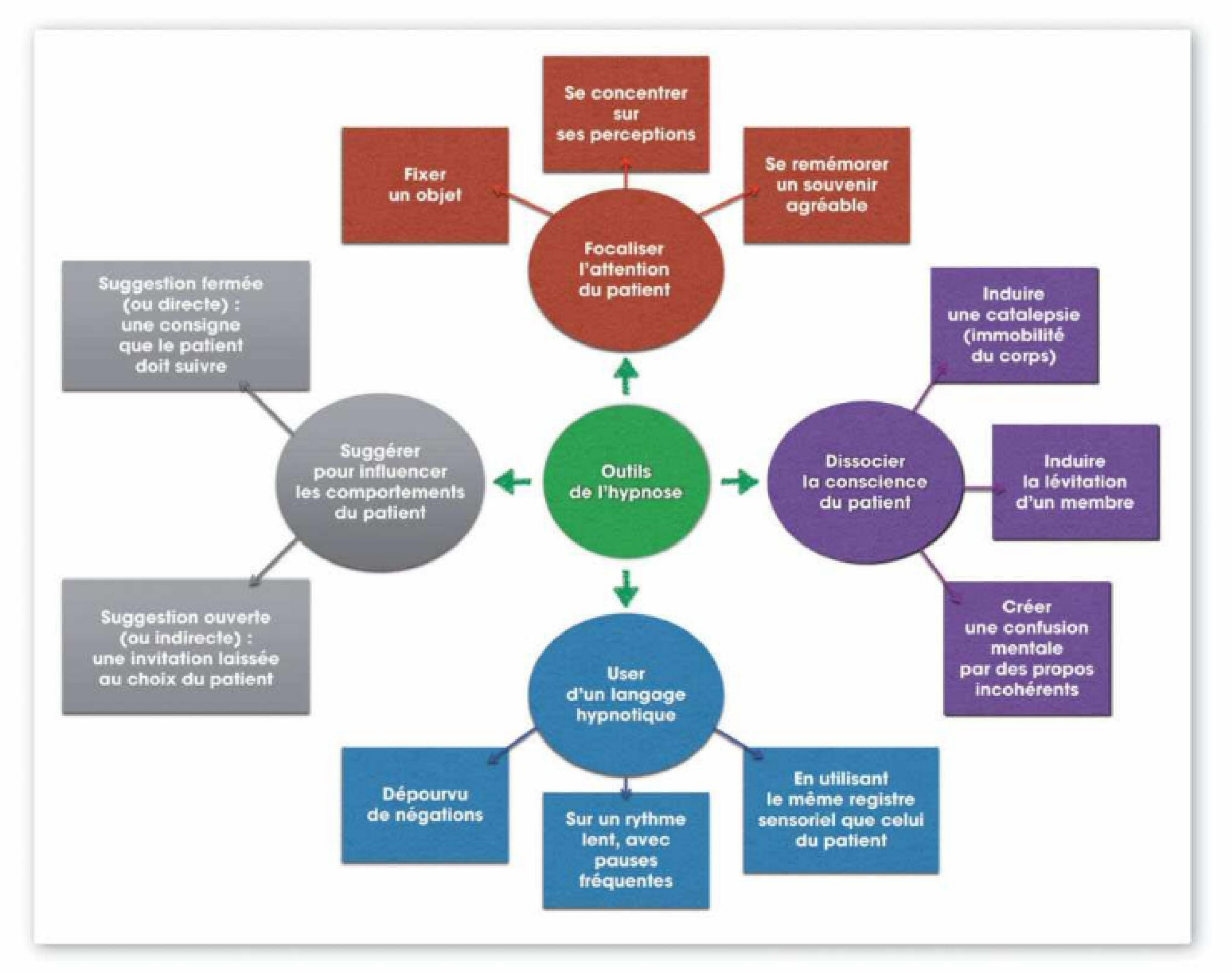


Figure 3. Exemples d'outils utilisés en hypnose pour induire une transe hypnotique chez le patient et influencer ses comportements.
© Universcience / A. Massaux.

confusion due au trop-plein d'informations extérieures qui nous saturent… Nous passons alors de l'état de conscience critique à celui de conscience hypnotique. Nos perceptions sensorielles sont modifiées, nous devenons indifférents au monde extérieur. Nos facultés de jugement et d'analyse sont amoindries, de même que certaines de nos facultés cognitives ; c'est ce qui nous rend plus suggestibles.

Cette transe hypnotique peut être atteinte involontairement et spontanément (comme lors de l'exécution d'un geste automatique où nos pensées ne sont pas centrées sur l'action à faire mais divaguent) ou bien volontairement, accédant à cet état guidé par un tiers ou soi-même (autohypnose). Les spécialistes de l'hypnose disposent de différents moyens pour nous faire atteindre cette conscience hypnotique et nous y maintenir (fig. 3).

Néanmoins, tout le monde n'est pas hypnotisable : environ 10 % de la population n'est pas réceptive, tandis que 5-10 % l'est hautement. Vous et moi faisons partie probablement des 80 % restants, potentiellement hypnotisables, pour peu que le praticien trouve les technique, vitesse et durée de l'induction hypnotique appropriées. La suggestibilité à l'hypnose fait d'ailleurs l'objet de recherches : elle est un trait stable dans le temps, serait liée à nos capacités d'attention et à la possibilité de la focaliser

Puisque l'hypnose peut modifier le niveau de conscience d'une personne, c'est donc qu'elle modifie le fonctionnement de son cerveau.

sur une image, une sensation ou un objet. Cependant, peu importe les techniques d'induction, si le patient ne veut pas être hypnotisé ou s'il n'a pas confiance en son praticien, cela ne fonctionnera pas. De même, le praticien ne peut imposer à une personne des actes qu'elle ne souhaite pas commettre ou subir. Si tel était le cas, elle sortirait d'elle-même de son état hypnotique pour revenir à sa conscience critique. L'hypnose requiert ainsi la participation du patient, qui reste présent et assiste à ce qui se passe en lui. La relation patient/praticien prend ici toute son importance, d'autant plus que les techniques inductives utilisées doivent être adaptées à la personnalité de chaque patient. On parle d'*alliance thérapeutique*. Selon les suggestions que le praticien emploie par la suite et le degré d'implication du patient, on distingue différentes formes d'hypnose (fig. 4), souvent combinées dans une même séance en fonction de la personnalité du patient et de sa problématique.

CERVEAUX SOUS HYPNOSE

Puisque l'hypnose peut modifier le niveau de conscience d'une personne, c'est donc qu'elle modifie le fonctionnement de son cerveau. Existe-t-il des preuves de ces modifications ? Les scientifiques étudient de plus en plus l'hypnose : en observant l'activité électrique du cerveau (électro-encéphalographie) et, plus récemment, grâce à l'imagerie cérébrale (tomographie par émission de positons, TEP, ou imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, IRMf). Jusqu'à présent, les électroencéphalogrammes recueillis n'ont pu mettre en évidence de signature spécifique à l'hypnose. De même, les études en imagerie cérébrale ont montré que les zones du cerveau activées fluctuaient en fonction des types de suggestions utilisées et des images mentales produites par le patient (visuelles, olfactives, auditives...).
Il existe cependant des constantes. La désactivation du précuneus et du cortex cingulaire postérieur, régions cérébrales impliquées dans les processus conscients,

Par ses paroles, le praticien induit la lévitation du bras de la patiente afin de dissocier sa conscience.



Nature des suggestions du praticien

★ Utilisée dans le monde du spectacle et dans le domaine de la santé (hypnosédation, hypnoanalgésie)
■ Utilisée dans le domaine de la santé (hypnothérapie)
● Utilisée comme outil de développement personnel (qualité de vie, choix de vie)

Indirectes
Subliminales, parfois dirigistes, permissives, douces, le poids des mots, à base de métaphores éthérées et évocatrices

Directes
Autoritaires, dirigistes

Hypnose classique (traditionnelle)

Amélioration par Milton Erickson, années 1930 et suivantes

Hypnose ericksonienne

Amélioration par les élèves d'Erickson, années 1970 et suivantes

Nouvelle hypnose

État du patient

Passif
Écoute les suggestions et modifiera par la suite ses sensations et ses modèles de comportement

Actif
Peut répondre à des questions orientées, écoute les suggestions qui atteignent son inconscient, il trouvera par lui-même les voies de sa guérison

Actif
Est guidé par le praticien, peut dialoguer avec lui, il trouvera par lui-même les voies de son mieux-être généralisé

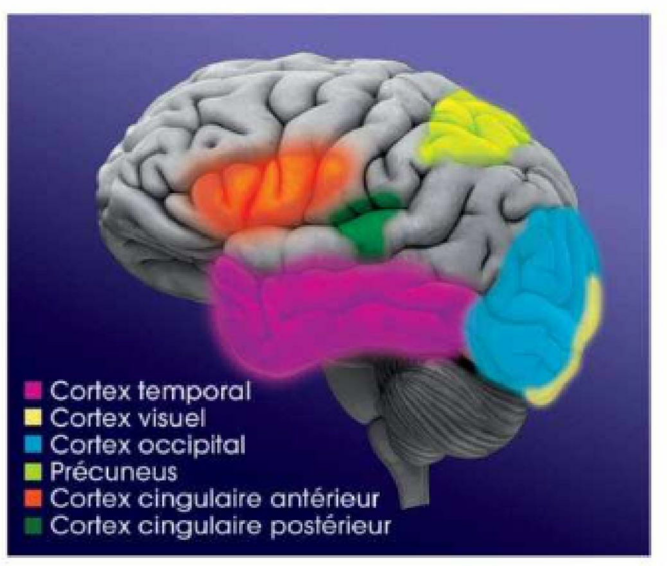
Figure 4. Les différentes formes d'hypnose. La première née est l'hypnose classique. L'hypnose ericksonienne dérive d'elle et lui emprunte ses outils, en améliorant son langage et la posture du patient. Dernière-née, la nouvelle hypnose dérive des deux précédentes et leur emprunte leurs outils qu'elle a améliorés, notamment le degré d'implication du patient. © Universcience / A. Massaux.



peut suggérer que le volontaire vit un état de conscience modifié. D'autres zones sont activées au contraire de façon privilégiée sous hypnose. Il s'agit du cortex cingulaire antérieur, qui joue un rôle clé dans les processus attentionnels et le contrôle cognitif de nos actions, mais également les cortex occipital, temporal et visuel, régions impliquées dans la production d'images mentales (fig. 5).

L'hypnose est utilisée pour diminuer les effets de la douleur. Comment agit-elle sur le cerveau ? En cas de stimulus douloureux, certaines parties gérant cette douleur sont activées. Sous hypnose, leur activité est réduite. De même que la région contrôlant l'aspect émotionnel de la douleur ou celle du contrôle des émotions (fig. 6). Ainsi, l'hypnose agit non seulement sur la composante sensorielle de la douleur, mais aussi sur celle émotionnelle, en modifiant la connectivité des centres impliqués dans la perception de la douleur.

Pendant l'hypnose, certains mouvements peuvent apparaître au niveau des yeux, des membres, durant la respiration et la déglutition… Comment ? L'activité des régions responsables des phases préliminaires du mouvement est modifiée par l'hypnose, mais pas celle des régions responsables de l'exécution du mouvement. Dans des cas de paralysie hypnotique (impossibilité pour le patient de bouger un membre sur suggestion du praticien), l'hypnose agit en inhibant l'exécution du mouvement, non sa préparation. Une intense activité du cortex frontal est observée, responsable du contrôle de la réalisation des mouvements : il contre l'ordre donné par le cortex moteur de bouger le membre. Le sujet hypnotisé se trouve dans une situation d'hypercontrôle. Existe-t-il une corrélation anatomique avec la suggestibilité des patients ? Une étude menée chez des sujets hautement hypnotisables semble montrer que la partie anté-



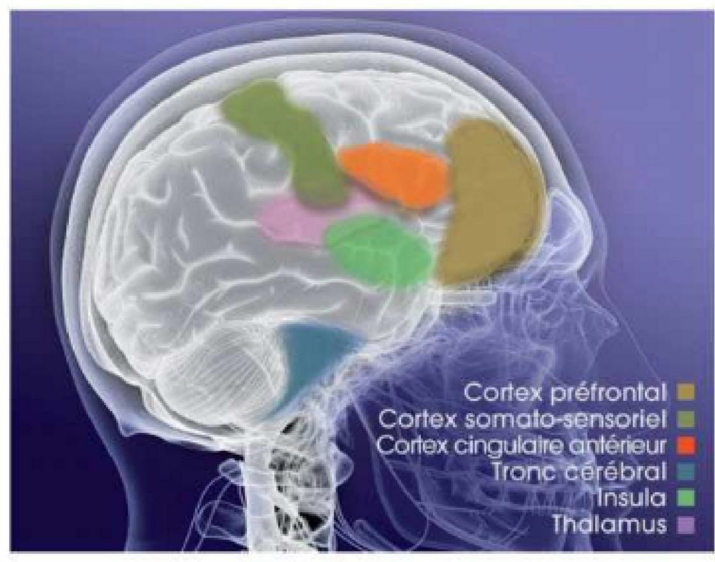


Figure 5. Zones cérébrales dont l'activité est modifiée lors de l'hypnose. © Eraxion / iStock.
Figure 6. Zones cérébrales dont l'activité est diminuée sous hypnose. Elles sont impliquées dans les composantes sensorielles, cognitives, affectives et comportementales de la douleur. Ainsi, le patient ne réagit pas lorsqu'un stimulus douloureux lui est appliqué. © Eraxion / iStock.

rieure du corps calleux serait plus volumineuse. Cette région relie les deux hémisphères du cerveau entre eux. Une augmentation de son volume dans la partie frontale permettrait donc aux deux lobes frontaux de mieux communiquer, conférant ainsi aux sujets un meilleur contrôle sur leurs pensées, sensations et émotions. D'autres études ont porté sur le fonctionnement cognitif du cerveau sous hypnose. Il a été mis en évidence que la mémoire de travail est moins efficace (d'où l'impossibilité de se souvenir de tout ce qui a été dit pendant la séance d'hypnose), alors que celle autobiographique est ravivée (puisque l'on se remémore un souvenir agréable). La perception du temps est altérée : il s'écoule plus lentement sous hypnose. Enfin, des sujets soumis au test de Stroop(5) le réussissent mieux pendant une séance d'hypnose : ils parviennent mieux à inhiber des processus automatiques de raisonnement. L'hypnose reste encore à ce jour un phénomène empreint de mystère. Les processus neurophysiologiques précis qui la sous-tendent sont inconnus, même si des avancées dans ce domaine ont été réalisées ces dernières décennies. L'hypnose nous apporte néanmoins de précieuses informations sur les mécanismes de la conscience et intéresse fortement les chercheurs à ce titre. Elle nous dévoile à quel point la frontière qui sépare la conscience de l'inconscient est mince. **A. M.**

(5) Le test, mis au point par le psychologue John Stroop (1897-1973) en 1935, consiste à dire rapidement de quelle couleur sont les lettres utilisées pour écrire un mot, désignant lui-même une couleur différente. On écrit par exemple « rouge » en bleu, ce qui crée un conflit cérébral : spontanément, on a tendance à lire le mot (rouge), alors qu'il faut indiquer la couleur (bleu).

Pour en savoir plus

À lire

Dossier spécial « Hypnose », *Cerveau & Psycho* n° 58, juillet-août 2013.

Rapport de l'INSERM, « Évaluation de l'efficacité de la pratique de l'hypnose », juin 2015.

Rapport de l'Académie de médecine, « Thérapies complémentaires – acupuncture, hypnose, ostéopathie, tai-chi. Leur place parmi les ressources de soins », mars 2013.

Sur Internet

École centrale d'hypnose :
> http://www.ecole-centrale-hypnose.fr

Société française d'hypnose :
> www.hypnose-sfh.com/

Confédération francophone d'hypnose et thérapies brèves : > www.cfhtb.org

Institut français d'hypnose : > www.hypnose.fr

Syndicat national des hypnothérapeutes :
> www.snhypnose.org

Aurélie Massaux

Après des études de biologie et un doctorat en neurosciences, Aurélie Massaux se consacre désormais à la médiation scientifique au sein de l'unité Sciences de la vie du Palais de la découverte. Elle participe aux diverses activités de l'unité et co-organise la Semaine du cerveau chaque année en mars. Elle est impliquée également dans la formation continue des médiateurs scientifiques *via* l'École de la médiation.

Remerciements
L'auteure tient à remercier Joyce Rives et Gwenael Le Bihan, praticiens en hypnothérapie à Larmor-Plage, certifiés EEPSSA, pour le partage de leur savoir et la relecture de cet article.

Pour aller plus loin

La longue histoire de l'hypnose

L'hypnose est née probablement de pratiques chamaniques. Sa trace est retrouvée dans des écrits égyptiens et des temples grecs de l'Antiquité. Elle explose en Europe aux yeux du public et de la communauté médicale au XVIIIe siècle avec un médecin autrichien d'origine allemande, Franz-Anton Mesmer (1734-1815), qui pratiquait des séances collectives de « magnétisme » (fig. I). Chassé d'Autriche, il exercera en France où il sera accusé de charlatanisme par l'Académie royale de médecine. Les passes magnétiques de Mesmer ne mourront pas avec lui, car reprises par l'un de ses élèves, Armand Marie Jacques Chastenet de Puységur (1751-1825). Il les accomplira à distance, les patients ne connaîtront plus de crises convulsives, mais seront dans un état particulier, entre sommeil et veille. De plus, ils seront très suggestibles et suivront les ordres du praticien. Puységur [redacted]ommera cet état *somnambulisme*, terme [redacted]epris par de nombreux médecins français. Vers 1800, l'Académie de médecine interdira à [redacted]ouveau cette pratique en France ; les méde-[redacted]ins fuiront vers la Grande-Bretagne où ils seront [redacted]bres de l'exercer.

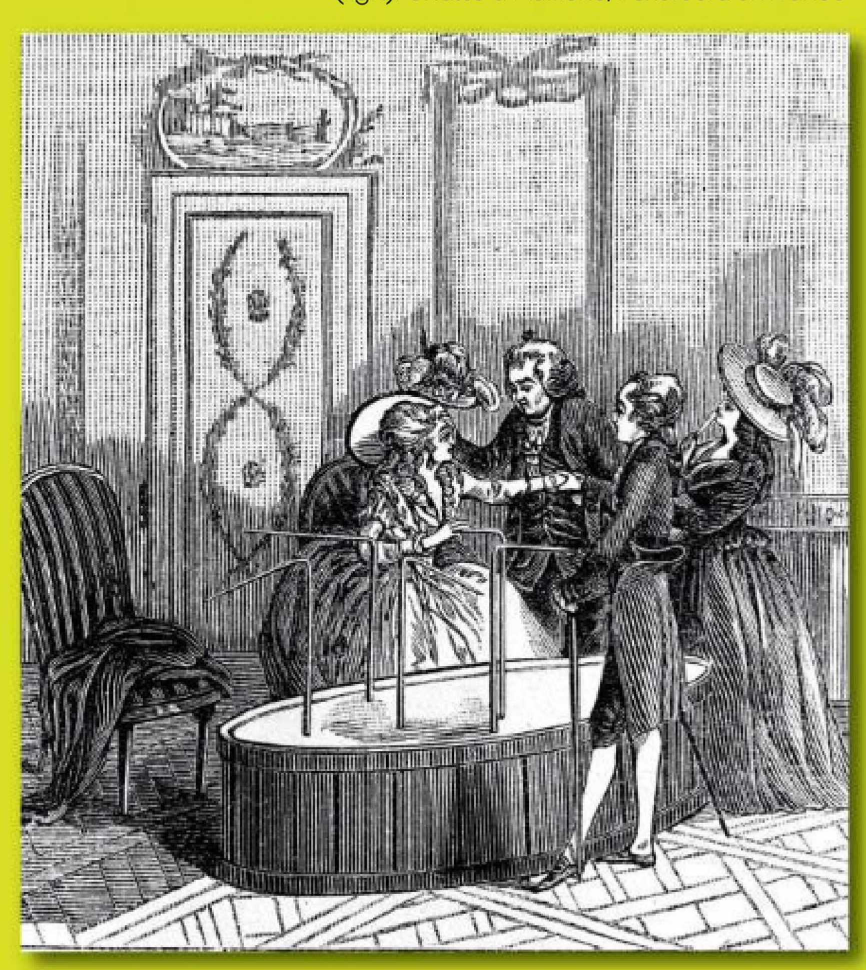


Figure I. **Lors de séances collectives, Franz-Anton Mesmer magnétisait ses patients par contact avec des tiges métalliques sortant d'un baquet rempli d'eau et de limaille de fer. En touchant ces personnes, parfois sur des parties intimes de leur corps, Mesmer pensait les guérir en permettant une meilleure répartition de leur « fluide magnétique ».** Wellcome Images / CC.

[redacted]n 1841, James Braid (1795-1860) assiste [redacted]u spectacle de magnétisme d'un ancien [redacted]édecin français : tout n'est qu'illusion et [redacted]uggestions. Il appellera *hypnotisme* cette technique de suggestion, en référence au dieu [redacted]rec Hypnos*. Le Royaume-Uni connaît alors un [redacted]mportant développement de l'hypnotisme ; la [redacted]remière revue consacrée à cette technique [redacted] voit le jour. Aux confins des colonies britanniques, le docteur James Esdaile (1808-1859) [redacted]écouvre cette revue et y trouve le moyen [redacted]'anesthésier ses patients : il réalisera plus de [redacted]00 interventions chirurgicales sous anesthésie [redacted]ypnotique. En ce milieu de XIXe siècle, la [redacted]ratique du magnétisme et du somnambu-[redacted]sme en France est toujours interdite, mais celle [redacted]e l'hypnotisme autorisée…

[redacted]n 1859, Alfred Velpeau (1795-1867) publie [redacted]ans la *Gazette médicale de France* – la plus [redacted]mportante revue médicale de l'époque – [redacted]n article sur une tumorectomie** réalisée sur [redacted]ne patiente hypnotisée et anesthésiée. À la [redacted]n du XIXe siècle, Jean-Martin Charcot, le [redacted]aître de l'hôpital de la Salpêtrière, découvre l'hypnose dans un cabaret : il la fait rentrer dans ce grand hôpital parisien. « Les leçons du mardi » dans la bibliothèque de l'hôpital

* Hypnos est un dieu bienveillant de l'Olympe qui panse les blessures du corps, du cœur et de l'âme pendant le sommeil.
** La tumorectomie désigne le retrait d'une tumeur, amas de cellules cancéreuses.



Figure II. **Lors des « leçons du mardi », célébrités et élèves se pressaient pour observer le maître de la Salpêtrière, Jean-Martin Charcot, hypnotiser de jeunes femmes hystériques.** A. Brouillet / CC.

attirent les célébrités (fig. II), les élèves affluent du monde entier pour suivre l'enseignement du maître – Sigmund Freud (1856-1939), Vladimir Bekhterev (1857-1927), Joseph Babinsky (1857-1932)…. À Nancy, loin des inductions hypnotiques issues du spectacle, les médecins Hippolyte Bernheim (1840-1919) et Ambroise-Auguste Liébeault (1823-1904) pratiquent une hypnose fondée sur les suggestions verbales, tout comme Braid avant eux. Une querelle opposera ainsi plusieurs années l'École de grand hypnotisme de la Salpêtrière à l'École de petit hypnotisme de Nancy : Charcot cantonnera l'hypnose au traitement des hystériques, alors que Bernheim et Liébeault l'étendront à tous les patients, sauf les hystériques !

De nombreux médecins étrangers se formeront à Nancy. L'école acquerra une renommée internationale et essaimera ses élèves en Autriche (Freud), Suisse, Russie (Ivan Pavlov (1849-1936) et Bekhterev) et aux États-Unis. Les écoles d'hypnose russes et américaines se développeront durant tout le XXe siècle, malgré le communisme et la Seconde Guerre mondiale. Le courant américain comptera de grands noms comme Clark Hull (1884-1952), Ernest Hilgard (1904-2001) ou Milton Erickson (1901-1980). Ce dernier influencera très fortement la pratique mondiale de l'hypnose : une longue maladie invalidante lui permettra de développer l'autohypnose, ainsi que sa propre vision de l'hypnose. Basée sur des suggestions non directives, elle laisse le patient mobiliser ses ressources propres pour amorcer sa guérison. L'hypnose actuelle est très éloignée de celle pratiquée à l'origine par Mesmer ou Charcot. Elle s'inspire plutôt des idées novatrices de Bernheim, Liébeault, Hilgard et Erickson. Dorénavant, les techniques hypnotiques font même partie des arsenaux persuasifs des politiques, publicitaires, commerciaux ou gourous…

Formes mathématiques
Les petites habitudes du hasard

Comment prévoir mathématiquement la propagation d'une épidémie, l'évolution à long terme d'espèces animales ou les transformations d'une langue au cours du temps ? Toutes ces questions impliquent des phénomènes aléatoires capables de s'influencer eux-mêmes en créant un effet boule de neige. Ce n'est qu'au début du XXe siècle qu'un mathématicien hongrois, du nom de George Pólya, mit au point un système de tirage au sort adaptatif permettant de modéliser ces comportements.

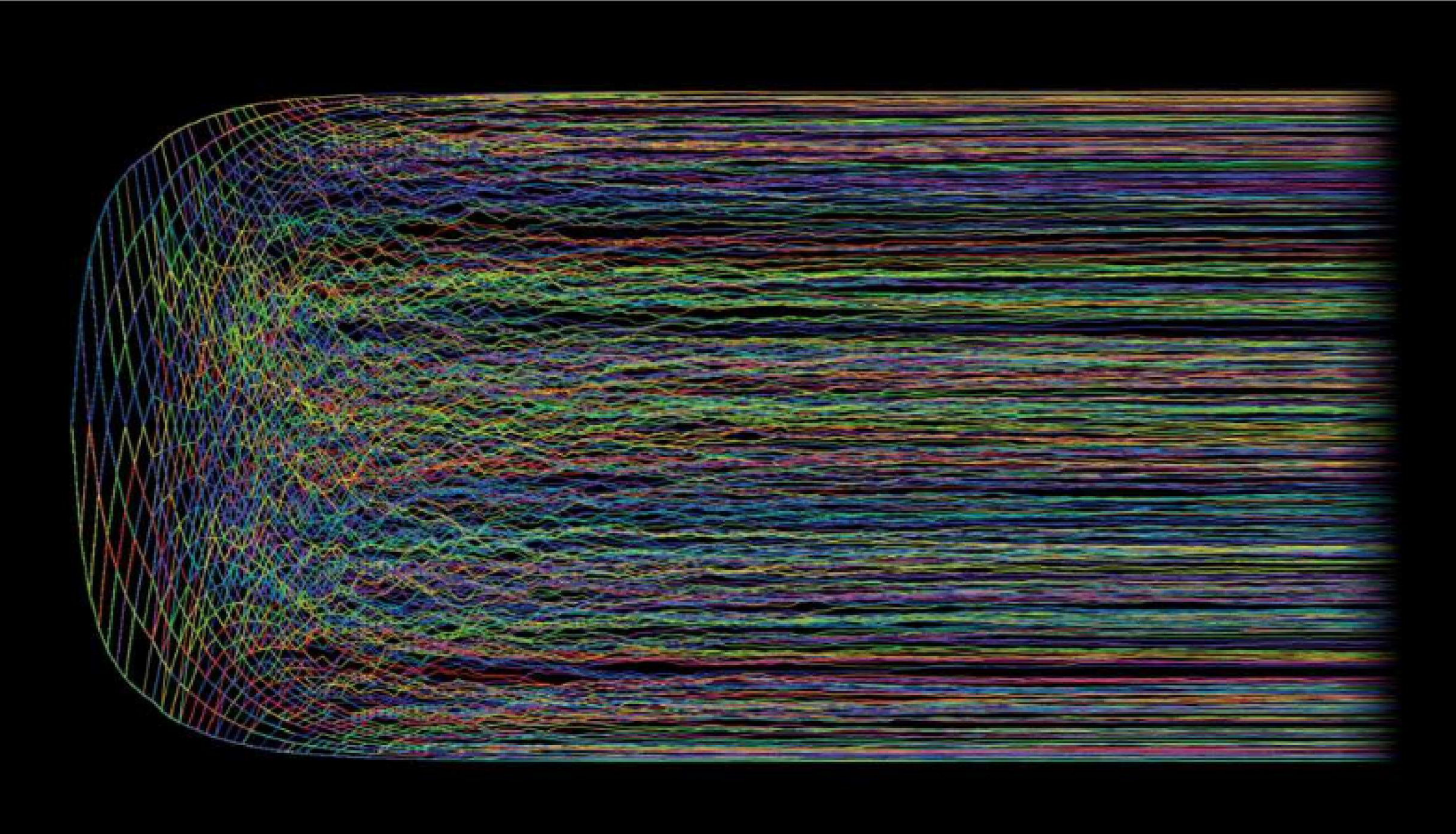
PAR **MICKAËL LAUNAY**, MÉDIATEUR SCIENTIFIQUE EN MATHÉMATIQUES, COMITÉ INTERNATIONAL DES JEUX MATHÉMATIQUES ET ASSOCIATION SCIENCE OUVERTE, AUTEUR DE LA CHAÎNE YOUTUBE MICMATHS

C'est idiot un dé. Ça n'a aucune mémoire. Vous pouvez le lancer cent fois en guise d'entraînement, le cent unième lancer n'aura pas plus de chances de tomber sur un 6 que le premier. Cette inaptitude à l'apprentissage est bien gênante, car de nombreux phénomènes aléatoires rencontrés dans le monde évoluent au fil du temps. Prenez la propagation d'une épidémie par exemple. Lorsqu'au début de l'hiver, la grippe ne concerne qu'une petite poignée d'individus, vos risques d'être touché sont relativement faibles. Mais dès que, prenant de l'envergure, la grippe frappe soudain une large proportion de la population, la contamination se fait bien plus menaçante. C'est ce qui est appelé le *hasard renforcé*. Plus il y a de malades, plus l'épidémie progresse vite, et plus l'épidémie progresse vite, plus il y a de malades. Vos chances d'être emporté par effet boule de neige varient ainsi de jour en jour.

L'ALÉATOIRE RENFORCÉ

Ni les dés ni les autres objets de tirage au sort classiques, tels que le pile ou face, ne savent imiter ce genre de phénomènes. Jusqu'au début du XXe siècle, les mathématiciens spécialistes de la théorie des probabilités étaient d'ailleurs bien embêtés. Puis, en 1931, le savant hongrois George Pólya (1887-1985) publia un article décrivant un processus aléatoire capable de s'auto-influencer au cours du temps. Son idée est assez simple. Prenez un récipient dans lequel vous placez deux boules, l'une bleue et l'autre rouge, parfaitement semblables au toucher. Ensuite, sans regarder, tirez-en une au hasard. Observez sa couleur, remettez-la dans le récipient et ajoutez-y également une nouvelle boule de la même couleur. Si, par exemple, vous avez tiré la boule bleue, vous avez désormais deux boules bleues et une rouge dans votre récipient. Répétez ce mode de tirage aussi longtemps que souhaité en respectant toujours cette règle : à chaque fois que vous tirez une boule d'une couleur, rajoutez-en une nouvelle de la même couleur.

Contrairement aux dés qui vivent chaque lancer comme si c'était le premier, les urnes de Pólya gardent en mémoire les boules déjà tirées et prennent peu à peu de petites habitudes. Par exemple, si 89 des 98 premiers tirages sont des boules rouges, cela signifie qu'il y a alors 90 boules rouges sur 100, en comptant les deux boules de départ. Le 99e tirage aura donc 90 % de chances de voir à son tour sortir une boule rouge. Plus il y a de boules rouges, plus de boules rouges sont tirées, et plus de boules rouges sont tirées, plus il y a de boules rouges. Pólya venait d'inventer le tout premier modèle mathématique de hasard renforcé.


Simulation de l'évolution de 400 urnes de Pólya. © M. Launay.

IL EN EST DES BOULES COMME DES ÉPIDÉMIES, DES MOTS OU DES GRENOUILLES...

Le savant hongrois utilisa ses urnes et boules pour décrire la propagation des épidémies. Mais dans les décennies suivantes, il fut établi que son modèle pouvait s'appliquer à bien d'autres situations. L'apparition d'un nouveau mot dans une langue reprend par exemple les mécanismes d'une épidémie. Au départ, seul un groupe restreint d'individus emploie ce mot. Puis son usage peut soit disparaître, soit se propager jusqu'à entrer dans le vocabulaire d'une large part de la population.

Le hasard renforcé est retrouvé également dans l'étude de l'évolution des espèces. Imaginez une population animale, disons de grenouilles, dont l'une des caractéristiques peut varier d'un spécimen à l'autre. Par exemple, des grenouilles jaunes et d'autres vertes cohabitent dans une mare. La couleur se transmettant génétiquement d'une génération à la suivante, s'il y a 70 % de grenouilles vertes et 30 % de jaunes, les prochaines naissances feront apparaître, dans les mêmes proportions, plus d'amphibiens verts que jaunes. Plus il y a de grenouilles vertes, plus il y a de naissances de grenouilles vertes et plus il y a de grenouilles vertes. Toujours ce fameux cycle de renforcement. Remplacez la mare par une urne et chaque animal par une boule de même couleur, et vous comprendrez que les urnes de Pólya constituent une parfaite analogie de l'évolution de cette population. Chaque tirage d'une nouvelle boule correspond à une nouvelle naissance.

Ces modèles de hasard renforcé ne nous apprennent pas grand-chose sur les possibilités d'évolution des phénomènes qu'ils décrivent, mais permettent de donner des estimations quantitatives des différents scénarios envisageables. Quelle est, par exemple, la probabilité que les grenouilles jaunes aient disparu totalement d'ici un siècle ? Quelles sont les chances pour que les proportions de chaque couleur s'équilibrent entre 40 et 60 % ? Voilà le genre de questions auxquelles les urnes de Pólya et leurs variantes pourront répondre.

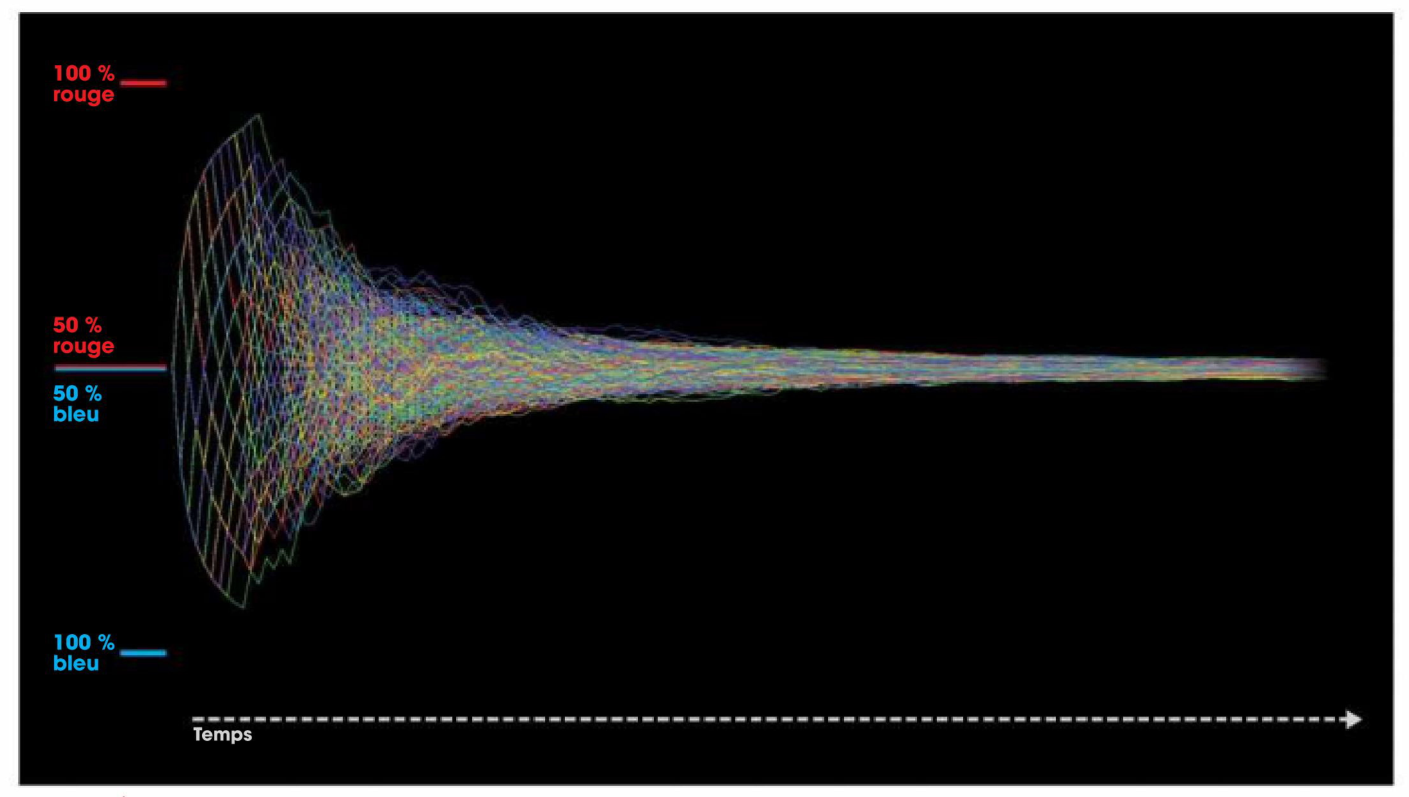


Figure 1. Évolution de la proportion de boules bleues et rouges quand la couleur de chaque nouvelle boule est choisie à pile ou face. © M. Launay.

LA MÉDUSE DE PÓLYA

La figure en ouverture d'article représente l'évolution simultanée au fil du temps de 400 urnes de Pólya simulées informatiquement. Chaque courbe d'une couleur différente correspond à une urne ; le temps s'écoule de gauche à droite. Plus une courbe se rapproche du bas, plus la proportion de boules bleues est importante ; plus elle monte, plus les boules rouges prennent le dessus. Toutes les courbes partent du même point situé à l'extrême gauche de la figure et placé à mi-hauteur, puisqu'il y a une boule rouge et une bleue dans chaque urne au commencement.

Trois zones distinctes apparaissent alors sur la figure. Sur la gauche, les courbes semblent former entre elles un filet composé de mailles à peu près régulières. Pendant cette période, les combinaisons sont encore trop peu nombreuses pour que les urnes se distinguent les unes des autres. Puis une zone de turbulence est observée, où les différentes courbes se séparent et fluctuent énormément, de façon visiblement chaotique. Enfin, au fil du temps, les fils se démêlent peu à peu et se stabilisent chacun à une hauteur précise. Les urnes ont pris alors leurs habitudes et se sont fixées sur une proportion rouge/bleu dont elles ne s'écarteront pratiquement plus.

Il est bien visible que chaque urne se renforce à sa manière et « choisit » sa propre proportion rouge/bleu. En comparaison, la figure 1 présente le diagramme obtenu si les couleurs des boules rajoutées à chaque tirage étaient tirées systématiquement à pile ou face, sans se préoccuper de la couleur de la boule tirée. La pièce n'ayant pas de mémoire, elle ne s'adapte pas et toutes les urnes convergent vers un scénario commun avec à peu près autant de boules de chaque couleur.

ÉQUIPROBABILITÉ

L'urne définie par Pólya en 1931 est parfaitement équitable, c'est-à-dire qu'elle ne donne d'avantage probabiliste à aucun des différents scénarios possibles. Il s'agit de l'une de ses propriétés les plus remarquables et étonnantes. Ainsi, au premier tirage, il y a une chance sur deux d'ajouter une boule bleue et une chance sur deux d'ajouter une boule rouge.

En étudiant toutes les combinaisons étape après étape, il est possible d'établir l'arbre de probabilités de la figure 2. Après le deuxième tirage, on constate qu'il y a une chance sur trois d'avoir ajouté deux boules bleues (soit $2/3 \times 1/2$), une chance sur trois d'avoir ajouté deux boules rouges ($2/3 \times 1/2$ également) et une chance sur trois d'en avoir ajouté une de chaque ($1/3 \times 1/2 + 1/3 \times 1/2$).

Cette égalité des scénarios se poursuit quel que soit le nombre de tirages effectués. Après le dixième tirage, chacune des onze configurations possibles a une chance sur onze d'advenir. Cette distribution uniforme peut s'observer empiriquement sur la méduse de Pólya (fig. 1) : les trajectoires se stabilisent sur des niveaux horizontaux répartis de façon régulière.

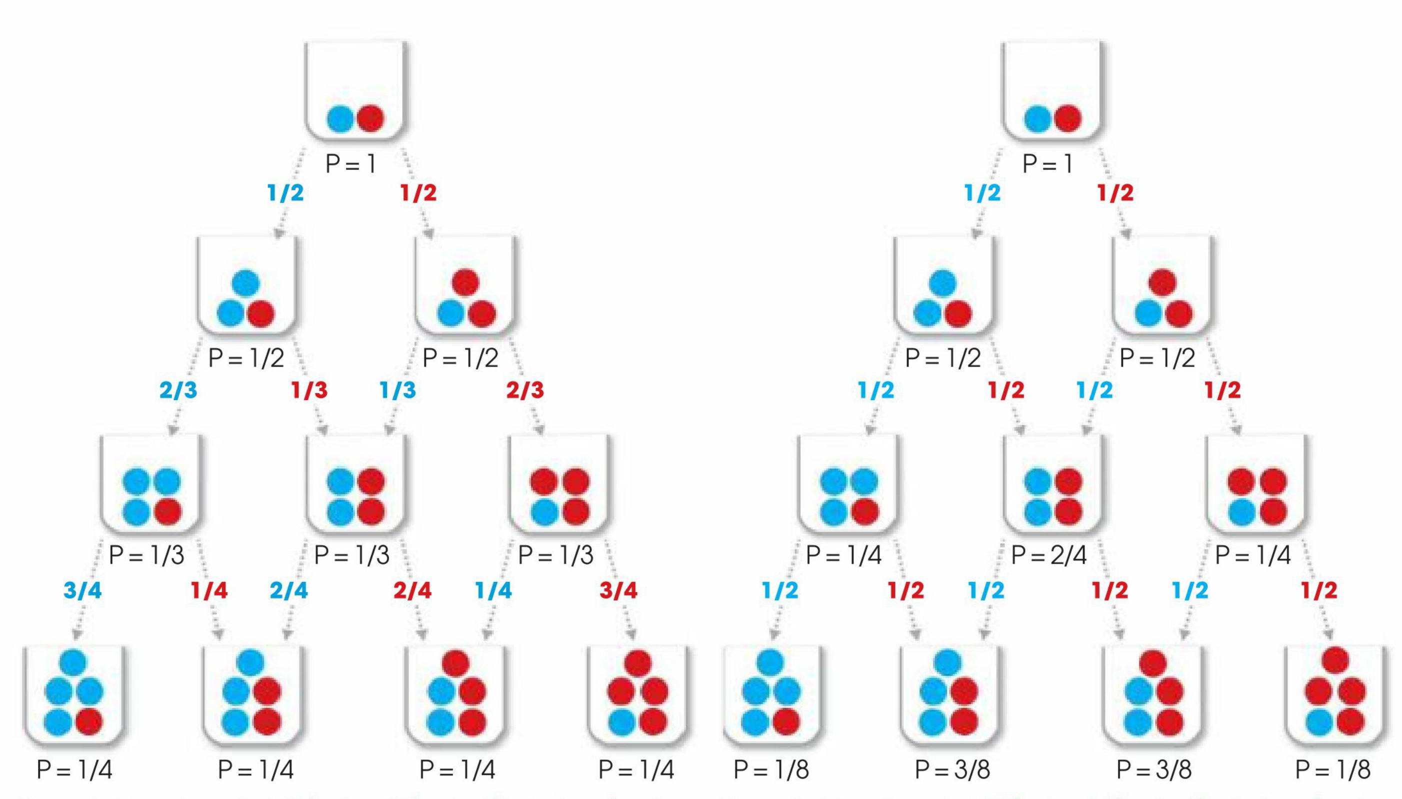


Figure 2. Arbre de probabilités des différents débuts de scénarios possibles d'une urne de Pólya. © M. Launay.

Figure 3. Arbre de probabilités des différents débuts de scénarios possibles d'une urne avec tirage à pile ou face. © M. Launay.

Comparons une nouvelle fois cette situation avec ce qui se passerait si la couleur de la boule ajoutée était désignée à pile ou face (fig. 3). Dès la deuxième étape, il n'y aurait plus d'équiprobabilité puisqu'il y a une chance sur deux pour que l'urne contienne deux boules bleues et deux rouges, contre une chance sur quatre qu'elle contienne, par exemple, trois boules bleues et une rouge. La probabilité constante de 1/3 dans le cas de l'urne de Pólya vient du fait que le premier tirage a changé la probabilité pour chaque couleur lors du deuxième tirage.

LA DIVERSIFICATION DES URNES

Au cours du dernier siècle, de nombreuses variantes des urnes de Pólya ont été inventées pour faire face à des situations plus subtiles. En génétique des populations, il est possible par exemple que certains caractères représentent un avantage sélectif. Les grenouilles vertes peuvent être plus aptes à se camoufler, ce qui augmente leurs chances de survie. Il peut être imaginé également des populations dans lesquelles les individus de différents caractères collaborent entre eux ou, au contraire, se livrent une concurrence acharnée.

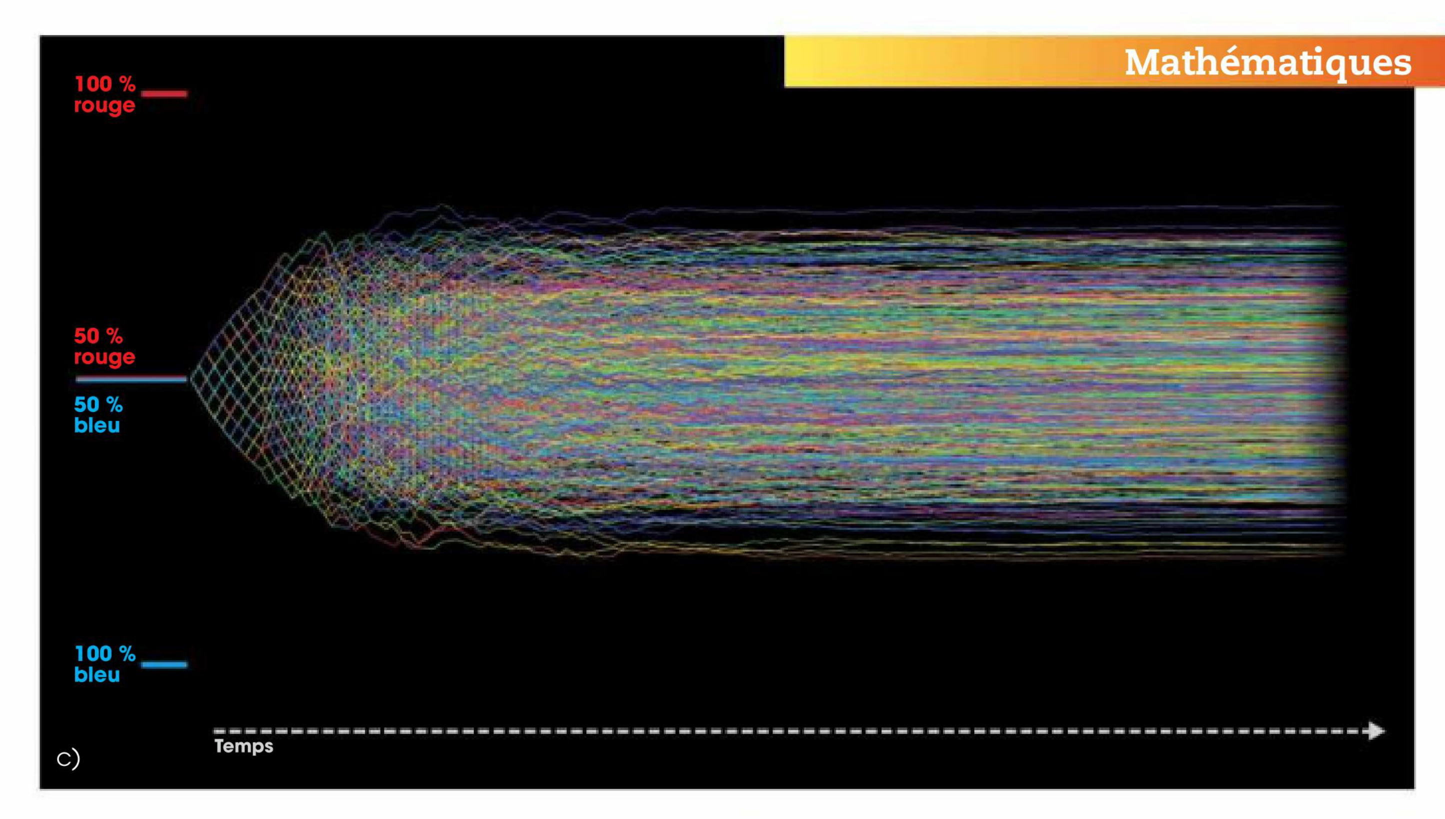
Pour transposer ces comportements aux urnes, il est possible de considérer à titre d'exemple que les boules d'une certaine couleur sont plus grosses, augmentant ainsi leurs chances de tirage. Ou bien envisager aussi qu'à chaque tirage, au lieu de ne rajouter qu'une seule boule de la couleur tirée, plusieurs le soient selon une grille établie précédemment de manière à favoriser le développement de certaines couleurs.

La figure 4 présente l'évolution de plusieurs situations différentes. La première (fig. 4a) correspond à un phénomène de forte concurrence. De façon simplifiée, chaque fois qu'une couleur est tirée, plus de billes de cette couleur que la fois précédente sont ajoutées (par exemple une la première fois, puis deux, quatre, huit…). De façon plus rigoureuse, une suite de renforcement est introduite. Ici, il s'agit de la suite des puissances de 2 : 1, 2, 4, 8, 16… Dans ce cas, la probabilité de rajouter une boule bleue s'il y a B boules bleues et

Figure 4. Simulations de l'évolution de 400 urnes de Pólya pour trois variantes différentes : a) forte concurrence, b) avantage sélectif et c) avantage donné à la collaboration. © M. Launay.

R boules rouges dans l'urne est égale à $2^B / (2^B + 2^R)$. Par exemple, s'il y a trois boules bleues et une rouge, alors cette probabilité est égale à 8 / (8 + 2) = 4/5, et non 3/4 comme ce serait le cas avec une urne de Pólya classique. Remarquons que les urnes de Pólya classiques apparaissent si la suite de renforcement correspond à celle des entiers naturels : 0, 1, 2, 3, 4, 5… En revanche, cela revient au cas du pile ou face si une suite constante est prise : 1, 1, 1, 1, 1… Avec les puissances de 2, dès qu'une couleur prend le dessus, l'autre se trouve très largement désavantagée. L'une des deux couleurs va donc éliminer systématiquement l'autre. Aucune cohabitation n'est possible.

La figure 4b présente un avantage sélectif qui n'est donné qu'à l'une des deux couleurs. Pour cela, une suite de renforcement différente est choisie pour



chacune des deux couleurs. Par exemple, il est possible de prendre la suite des puissances de 2 pour les boules bleues et la suite des entiers naturels pour les rouges. Ainsi, s'il y a quatre boules bleues et cinq rouges dans l'urne, la probabilité de tirer une boule bleue est égale à 16 / (16 + 5) = 16/21. La couleur défavorisée s'éteindra alors inévitablement, plus ou moins rapidement.

La figure 4c montre un modèle conférant un léger avantage à la « collaboration » entre les différents caractères. Pour cela, des suites de renforcement qui croissent moins rapidement que celle des entiers naturels peuvent être prises, mais sans être constantes – par exemple une racine carrée ou un logarithme. Dans ce cas, l'avantage donné à la couleur en surnombre, plus faible que pour les urnes classiques, empêche que l'une des deux « n'écrase » complètement l'autre. Cette modélisation ne comporte pas de collaboration à proprement parler, mais une forme d'« agressivité » réduite. On constate que les scénarios sont plus concentrés vers le centre et plus rares aux extrémités que sur la figure 1.

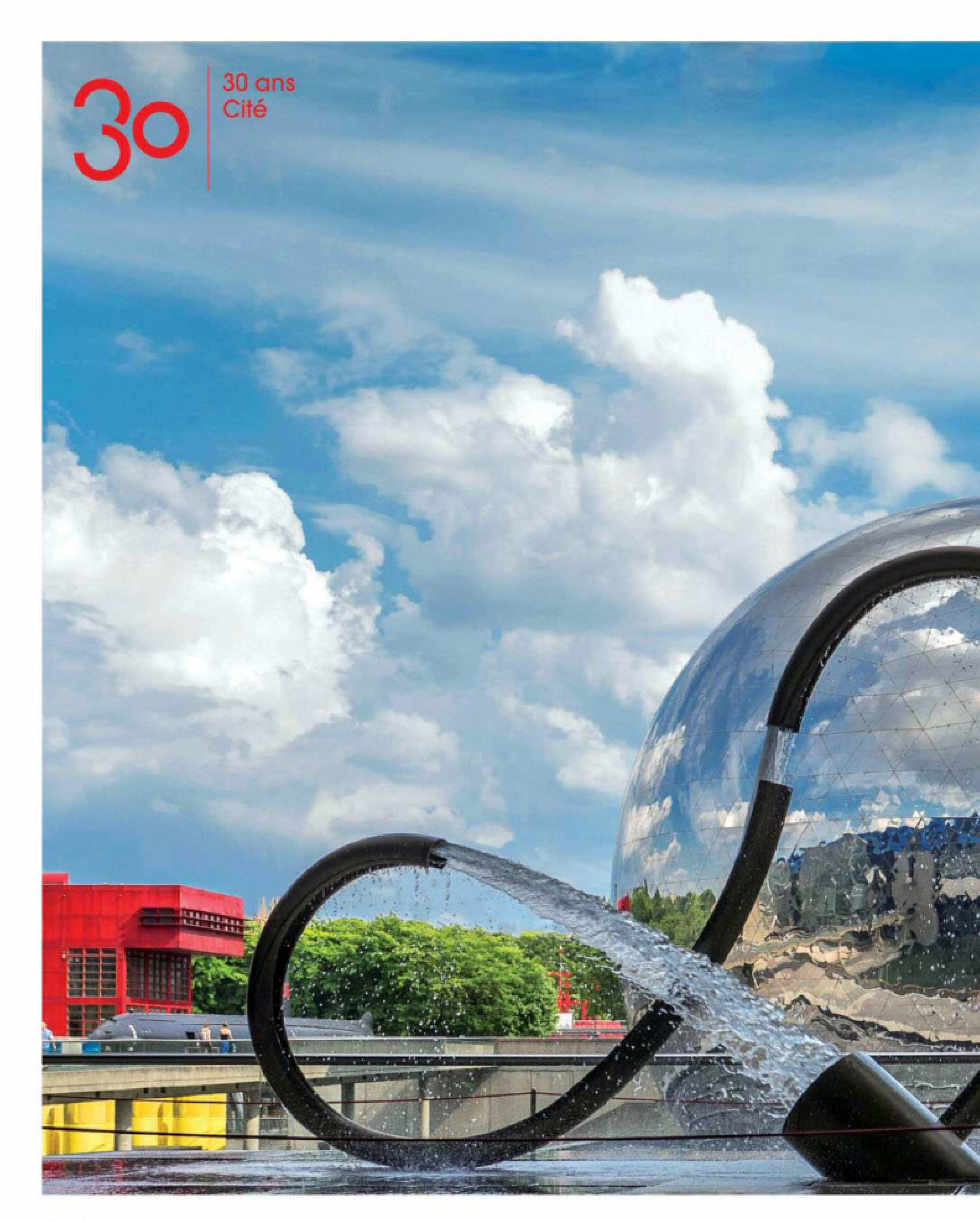
L'exemple des urnes de Pólya montre comment les mathématiciens peuvent utiliser le hasard et les modèles aléatoires pour aider à comprendre des phénomènes naturels comme la propagation d'épidémies. À noter que, justement, le Palais de la découverte propose actuellement deux expositions temporaires dont les thèmes sont le hasard et la propagation au sens large du terme (encadré *Contagion et hasard envahissent le Palais*). **M. L.**

Contagion et hasard envahissent le Palais

Il existe différents modèles mathématiques qui cherchent à prévoir l'évolution d'une épidémie. Chacun d'entre eux a ses spécificités. Le modèle de Pólya est bien adapté pour décrire l'apparition d'une épidémie dans une petite population ; des variantes sont utilisées pour étudier les phénomènes de bulles et de crises dans les marchés financiers (diffusion d'opinions sur telle ou telle valeur).

Un tout autre modèle est proposé dans l'exposition *Viral, du microbe au fou rire, tout s'attrape*, présentée au Palais de la découverte jusqu'au 27 août 2017 : il s'agit du modèle « SIR » (pour sains, infectés, résistants), classique pour les épidémies dans de grandes populations.

Dans la salle voisine, du 6 décembre 2016 au 27 août 2017, l'exposition *Faites vos jeux ! Quand les maths s'en mêlent* porte sur un thème qui semble *a priori* éloigné, le hasard d'un point de vue mathématique. Et pourtant, le modèle de la percolation, qui y est présenté, est tout indiqué pour étudier la propagation d'une maladie (ou d'autre chose, tel un incendie) chez des individus immobiles, comme par exemple les arbres d'une forêt. Alors n'hésitez pas à vous rendre au Palais pour en savoir plus !


30
30 ans
Cité

LA CITÉ DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE
Le mouvement perpétuel

La Cité des sciences et de l'industrie a trente ans. Trente ans de succès qui ont vu le passage de près de 89 millions de visiteurs dans le cinquième lieu culturel le plus visité de France. Trente ans d'innovation, également, dans la droite ligne de la mission qui lui a été confiée. La vision de ses créateurs, aux antipodes d'une forme muséale figée dans le temps, s'est concrétisée dans ce bâtiment monument, à la silhouette reconnaissable entre toutes mais aux entrailles en perpétuelle révolution.

PAR **OLIVIER QUEZADA**, ÉDITEUR ET RÉDACTEUR INDÉPENDANT



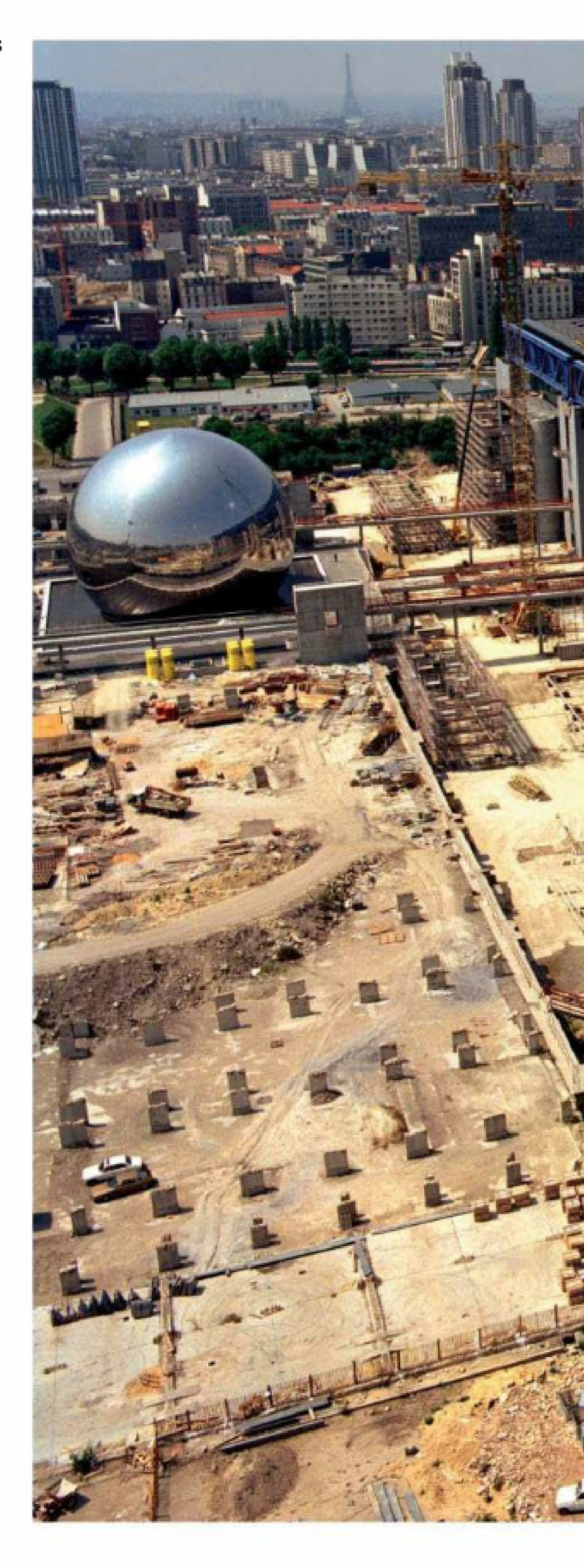
La fontaine Sygma antigravitationnelle de Manolis Maridakis, installée sur le parvis sud de la Cité des sciences et de l'industrie en 1990.
© P. Levy / EPPDCSI.

L'immense vaisseau de la Cité des sciences et de l'industrie dresse ses impressionnantes piles de béton à l'extrémité nord de l'un des plus beaux parcs urbains de la capitale. Cette véritable institution parisienne est cependant l'ultime avatar d'une étrange aventure industrielle au goût d'inachevé, qui a su rebondir dans des relents de scandale.

SCANDALE À LA CITÉ DU SANG

Depuis 1867, la « Cité du Sang » rassemblait les abattoirs et les marchés aux bestiaux destinés à nourrir la capitale. Mais, malgré des travaux importants menés en 1930, la question d'une modernisation se pose à nouveau dès les années 1950, dans un contexte marqué par une transformation importante du circuit de la viande. Ignorant les mutations induites par les progrès considérables de l'industrie frigorifique, un grand chantier de reconstruction est lancé en 1959. Toutefois, tandis que le chantier accumule retards et difficultés, l'évidence finit par s'imposer : il est désormais plus rentable d'abattre le bétail sur les lieux de production et ces nouveaux abattoirs ne présentent plus aucune utilité. Les travaux sont arrêtés en 1971 et le site de la Villette cesse définitivement de fonctionner en 1974. Restent alors une gigantesque friche industrielle de 55 hectares et, entre autres bâtiments, une salle des ventes monumentale qui n'aura jamais été achevée.

Face à cette situation, les pouvoirs publics finissent par saisir l'opportunité offerte par cette emprise à reconstruire, en plein cœur d'un quartier populaire, pour initier un ambitieux projet de rénovation urbaine, confié à l'établissement public du parc de la Villette en 1979, sous la direction de Paul Delouvrier (1914-1995). Dans les cartons, la création d'un grand parc ouvert à tous, s'articulant autour d'un auditorium (la future Cité de la musique et sa Philharmonie) et d'un « musée des sciences, des techniques et de l'industrie ». La construction de ce dernier s'appuiera sur les conclusions



Vue du chantier de la Cité des sciences, été 1984. À gauche, on distingue la Géode (architectes Adrien Fainsilber et Gérard Chamayou) qui sera inaugurée l'année suivante, le 6 mai 1985. © P. Astier.





Inauguration de la Cité des sciences et de l'industrie, le 13 mars 1986. De gauche à droite : Maurice Lévy, François Mitterrand, président de la République, Adrien Fainsilber, architecte, Hubert Curien, ministre de la Recherche et de la Technologie.
© A. M. Butzbach.

du rapport que Maurice Lévy, physicien et ancien président du Centre national d'études spatiales, vient de rendre au président de la République sur la faisabilité d'un tel projet dans le cadre d'une réhabilitation de la fameuse salle des ventes.

UN RAPPORT POUR UNE RÉVOLUTION

Maurice Lévy perçoit immédiatement que la seule taille du bâtiment implique un projet de très grande ampleur : près de 150 000 m^2 de surface cherchent en effet un nouveau destin… Ce ne sera d'ailleurs pas la seule fois où cette cathédrale industrielle imposera sa volonté à ses occupants. Conscient de cette exigence ainsi que du retard de la France en matière de communication scientifique, technique et industrielle, le scientifique décide de puiser son inspiration à l'étranger, la démarche étant inédite au niveau national. Il n'hésite pas à prendre son bâton de pèlerin pour étudier, entre autres, les réalisations du Museum of Science de Boston, de l'Ontario Science Centre de Toronto et, surtout, du plus célèbre et novateur de ces établissements d'un genre nouveau : l'Exploratorium de San Francisco. Il ferme ainsi une boucle étonnante puisque le physicien Frank Oppenheimer (1912-1985), fondateur de cette dernière institution, avait entrepris un voyage comparable en Europe, en 1965, et en était revenu très impressionné par le Palais de la découverte, devenu institution sœur de la Cité des sciences et de l'industrie depuis la création d'Universcience, dont le fonctionnement inspira en partie les activités mises en place à l'Exploratorium !

De retour en France, Maurice Lévy s'attelle à la rédaction de son rapport et définit une série de principes très novateurs, qui s'inscriront dans l'ADN du nouvel établissement. La philosophie générale est assez consensuelle, mettant en avant la présentation de l'aventure scientifique, le déve-

loppement de l'esprit critique et de la créativité, la compréhension du présent pour mieux envisager le futur et la promotion de l'industrie nationale. Mais là où le rapport Lévy fera aussi date, c'est dans son approche révolutionnaire des moyens à mettre en œuvre pour parvenir à ce résultat. Fini le découpage disciplinaire, source de cloisonnement entre les différentes approches scientifiques. La présentation sera résolument thématique, dynamique et destinée à se réinventer sans cesse. Un concept inédit fait même son apparition, celui d'exposition quasi permanente… François Mitterrand (1916-1996), alors président de la République, résume bien la philosophie du projet en évoquant, lors d'un discours prononcé au Palais de la découverte en 1988 : « la Cité des sciences et de l'industrie, l'immense et belle et nécessaire réalisation dont j'ai reçu le projet des mains de mon prédécesseur et que j'ai eu à cœur de continuer jusqu'à son achèvement récent, dans la mesure où l'on peut parler d'achèvement, car c'est un mouvement en perpétuelle transformation ». Ainsi un objet culturel nouveau voit-il le jour, un musée sans collection ni parcours avéré, à la fois centre de présentation, d'expérimentation et d'échanges, où les dispositifs interactifs et le multimédia règneront en maîtres.

UN MÉDIA DE BÉTON, DE VERRE ET D'ACIER

Cette philosophie, c'est l'architecte Adrien Fainsilber qui est chargé de la mettre en espace, à travers la réhabilitation de la salle des ventes des abattoirs préexistants. Le chantier est à l'échelle du bâtiment, hors normes, avec pas moins de quinze hectares de surface, répartis sur sept niveaux ! Inspiré par le rapport Lévy, le résultat est un espace qui permet de multiples cheminements et n'enferme pas le visiteur dans un parcours balisé. Au contraire, ce dernier, une fois les portes franchies, se voit offrir de nombreuses possibilités, qu'il lui reviendra d'explorer à sa guise, passant



Mur d'images dans l'exposition *Mesures et démesure*, 1995, scénographiée par Jean Nouvel.
© M. Viard / EPPDCSI.



Vue de l'installation immersive *Avatar* dans l'exposition *Jeu Vidéo, une exposition temporaire pour jouer et déjouer*, 2013.
© P. Verzone, Agence Vu / EPPDCSI.

d'une salle d'exposition à la médiathèque, de la Cité des enfants à celle des métiers, du planétarium à l'une des aires de restauration, au gré de ses envies. À quelques mètres à peine, il pourra se laisser envoûter par la sphère géodésique de la Géode, l'un des plus célèbres dômes IMAX du monde, ou même embarquer sur l'*Argonaute*, authentique sous-marin d'attaque de la Marine nationale, venu terminer paisiblement son existence dans les jardins de la Villette, pour le plus grand bonheur des enfants. L'ensemble se vit comme un média moderne, aux multiples entrées et niveaux de lecture, et en perpétuel renouvellement.

Cette mutation constante, le bâtiment l'impose d'ailleurs à l'institution qu'il abrite. Il constitue une « boîte capable », un écrin en mesure d'accueillir toutes formes de projets, de réaménagements, d'une plasticité considérable. En revanche, il nécessite également des soins attentifs et constants. La complexité des installations, l'ampleur même des espaces à disposition et l'imbrication de fonctions

aussi diverses que les expositions, les salles de lecture, les activités commerciales ou de restauration impliquent que la Cité des sciences et de l'industrie, telle qu'elle est finalement nommée, soit un chantier permanent, et ce, depuis son ouverture. Ainsi, après trente ans d'histoire, pratiquement pas un seul endroit n'est identique à ce qu'il était le 13 mars 1986, lorsque la rencontre de la comète de Halley et de la sonde Giotto avait fourni une occasion idéale pour l'inauguration de la nouvelle institution.

LE CHANGEMENT, UNE AMBITION CONSTANTE

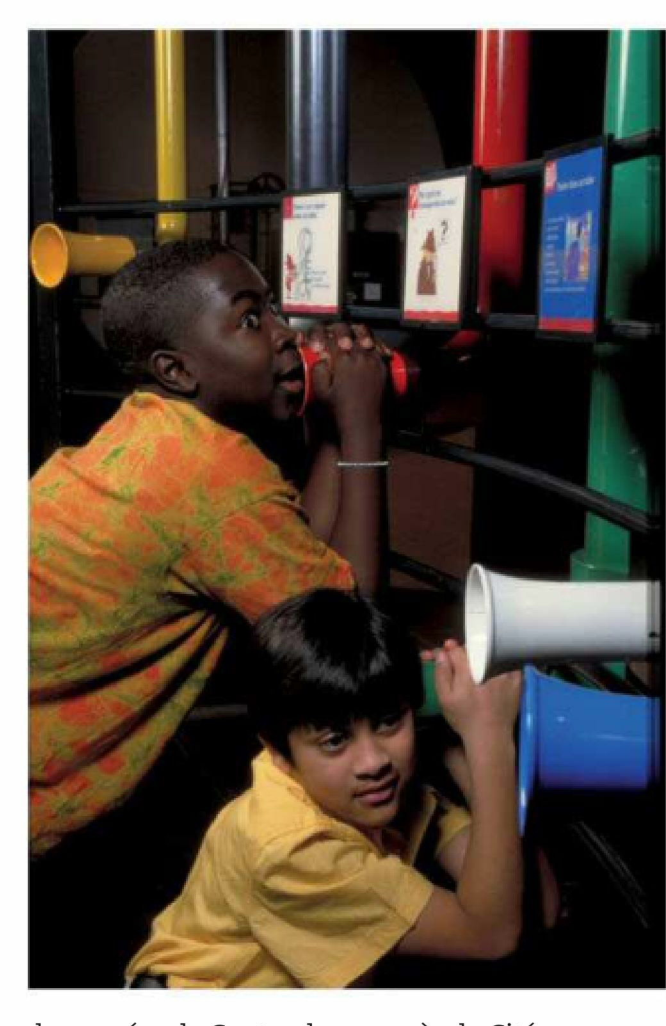
Si la Cité est un objet dynamique, c'est tout autant grâce à la philosophie insufflée par ses initiateurs qu'en raison de ses objets d'étude : traiter d'innovation, de progrès, de mutations technologiques et d'avancées scientifiques implique d'être soi-même à la pointe des évolutions. Impossible dès lors de s'emprisonner dans un modèle, aussi satisfaisant soit-il. Chacune des expositions temporaires proposées au public, chacun des réaménagements de ces expositions quasi permanentes s'appuie évidemment sur l'expérience des projets antérieurs, mais pour mieux intégrer des évolutions majeures. La lecture du riche catalogue des 336 expositions présentées au public depuis 1986 permet d'ailleurs de se faire une idée de cette remise en cause sans fin des principes muséographiques et scénographiques dont la Cité a été le cadre.

Si, en 1988, *La vigne et le vin* intégrait des éléments du monde réel (vignes, ateliers de dégustation, etc.), pour le plus grand plaisir des visiteurs, dès l'année suivante, *Les savants et la Révolution* prenait le parfait contre-pied de cette approche en recréant de toutes pièces, par l'intermédiaire de comédiens professionnels, des saynètes historiques. En 1995, *Mesures et démesure*, la bien nommée, faisait appel à un grand nom de l'architecture, Jean Nouvel, pour créer un espace scénographique monumental (2 100 m^2) qui fera date dans l'histoire de la Cité. En 2003, le public plébiscitera la démarche de *Climax*, présentation pionnière sur le réchauffement climatique et première exposition entièrement virtuelle et numérique, construite à partir de l'exploitation de bases de données. Il s'enthousiasmera pour son aspect immersif, lui permettant d'enregistrer la plus importante fréquentation pour une exposition temporaire, avec plus de 800 000 visiteurs. Les collaborations avec des univers *a priori* éloignés de la communication scientifique et technique prendront un nouveau relief lors de *Zizi sexuel l'expo*, en 2007, exposition élaborée avec Zep, l'une des stars de la bande dessinée. Enfin, *Léonard de Vinci, projets, dessins,*

Art, mécanique et biomimétisme dans l'exposition *Léonard de Vinci, projets, dessins, machines*, 2012.
© P. Levy / EPPDCSI.



machines, en 2012, se réappropriera le thème de la réalité augmentée en superposant aux extraordinaires maquettes présentées une couche d'interprétation interactive.



MUTER POUR S'ADAPTER AUX MONDES CONTEMPORAINS

La redéfinition des modes de communication muséographiques et scéniques ne se limite évidemment pas aux expositions temporaires, mais touche également les expositions dites permanentes. Dans le projet initial, ces dernières devaient suivre un rythme de renouvellement élevé, tous les cinq ans. Cette exigence n'a pu tenir face aux contraintes budgétaires et techniques, lot de toutes les institutions culturelles, néanmoins son esprit a été respecté. Les espaces dévolus au permanent ont été remaniés à de très nombreuses reprises, chaque opération ayant été l'occasion d'actualiser les dispositifs utilisés, de corriger d'éventuelles défaillances, de chercher à améliorer l'expérience vécue par les visiteurs, notamment en renforçant l'aspect narratif des expositions, proposant des parcours plus en accord avec l'esprit cartésien des Français.

Ces différentes évolutions ont accompagné également la diversification de l'offre de la Cité. Depuis son ouverture, loin de se cantonner à la seule présentation d'expositions permanentes et temporaires, cette dernière multiplie les initiatives pour toucher tous les publics de maintes façons, en s'adaptant aux attentes de ses visiteurs. Si, dès 1986, les enfants ont été accueillis dans les 500 m^2 de l'Inventorium, la Cité voit beaucoup plus grand en 1992 avec l'ouverture de la Cité des enfants (2 500 m^2 pour les 3-7 ans et 5-12 ans), dont la surface sera doublée encore en 2009, en élargissant son audience aux bambins de 2 ans. Toujours pour répondre aux désirs de ses usagers, viennent s'ajouter à cet ensemble, au fil des années, le Centre des congrès, la Cité des métiers, la Cité de la santé, ou bien encore le Carrefour numérique[2], avec son Fab Lab et son Living Lab. Sur un tout autre plan, les éditions, et ce, depuis l'ouverture, multiplient la diffusion hors les murs de catalogues et d'ouvrages en lien direct ou non avec les expositions, en intégrant aujourd'hui leur déclinaison numérique.

La médiathèque, pièce centrale du dispositif imaginé par Maurice Lévy, peut, quant à elle, se targuer d'avoir été l'une des premières entièrement informatisées, à une époque où le Minitel régnait encore en maître et où la numérisation, telle qu'elle est conçue de nos

jours, n'était qu'un fantasme. Au fil des années, elle a su si bien s'adapter et se transformer qu'elle est encore actuellement la troisième bibliothèque publique de France. Cet exemple illustre bien l'ampleur du défi à relever pour une institution désireuse de montrer les évolutions de la science et de la technologie. Les visiteurs d'aujourd'hui, et en particulier les plus jeunes, vivent au quotidien la révolution numérique et ne seraient sans doute pas aussi enthousiastes que leurs prédécesseurs devant les dispositifs multimédias des années 1980. Pour continuer à interpeler, à émouvoir, la Cité peut compter sur son potentiel d'innovation, sur une expérience de trente ans en matière de création, d'imagination, de mise au point d'approches nouvelles. Ses concepteurs, en particulier dans les laboratoires multimédias, expérimentent, testent, proposent. Les outils interactifs, l'une des sources de son succès, s'adaptent ainsi en permanence, développant par exemple leurs dimensions collectives et immersives ou favorisant l'expérience hors les murs par le biais des applications pour smartphones, entre autres.

UN ÉTABLISSEMENT LEADER

La culture de l'innovation, partie intégrante de l'identité de la Cité, a aussi souvent fait de cette dernière un précurseur

***Techniques pour communiquer*, Cité des enfants première génération, ouverte en 1992.**
© M. Lamoureux / EPPDCSI.

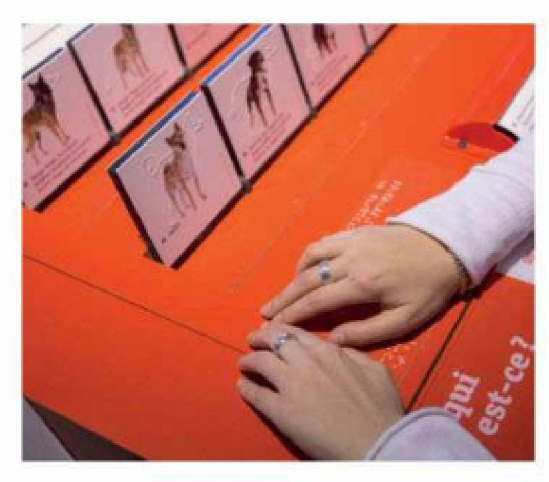
Imprimante 3D au Fab Lab du Carrefour numérique[2], 2016.
© N. Breton / EPPDCSI.





Atelier de médiation sur Explora, 2015. © A. Robin / EPPDCSI.

dans le domaine de la médiation culturelle et scientifique. Mobilisés autour des expositions permanentes ou temporaires, les médiateurs font découvrir et enrichissent les expositions, facilitant parfois l'accès à des contenus scientifiques plus complexes. Un autre exemple représentatif de cette culture de l'innovation est sans doute celui de la politique volontariste en matière d'accessibilité. C'est à l'initiative de Paul Delouvrier, premier président de l'établissement public de la Villette, que cette préoccupation va figurer en bonne place dès la conception de la Cité, une première en France. Un architecte spécialisé est missionné pour intégrer les problématiques liées à l'accueil des personnes en situation de handicap. Des spécialistes et des personnes handicapées participent à la conception de tous les équipements de la Cité et, en 1984, une *Charte des personnes handicapées* est publiée. Ainsi, entre autres démarches, les circulations intègrent l'accès des personnes à mobilité réduite, des sous-titres sont ajoutés aux séquences audiovisuelles et l'utilisation d'éléments tactiles et sonores est généralisée. L'institution s'inscrit alors dans un mouvement qui bouleverse l'approche du handicap : l'accessibilité universelle. En effet, les aménagements, qui paraissent de prime abord ne s'adresser qu'à des populations spécifiques, rendent les visites plus accessibles au plus grand nombre. Les éléments tactiles et sonores renforcent la compréhension, les sous-titres, pictogrammes et illustrations simplifient la vie des non-francophones,



Consigne en braille et images en bigraphisme sur un jeu de l'exposition *Chiens et chats l'expo*, 2015. © G. Leimdorfer / EPPDCSI.

et ainsi de suite. Cette politique volontariste vaudra à la Cité d'être le premier établissement culturel à bénéficier du label *Tourisme et Handicap*, en 2001, et ce, pour les quatre familles de handicaps (auditif, mental, moteur et visuel).
En s'engageant dans cette voie, l'institution ne faisait que respecter à la lettre l'article 2 de son décret de création : « rendre accessible à tous les publics le développement des sciences, des techniques et du savoir-faire industriel ». Cette même philosophie préside à la mission *Vivre Ensemble*, lancée par le ministère de la Culture et de la Communication en 2003, qui vise à lutter contre toutes les formes de discrimination, où la Cité joue une nouvelle fois le rôle de laboratoire et de pilote. Comme le revendique Bruno Maquart, actuel président d'Universcience, « nous devons être les plus ouverts possibles, sortir de nos murs et participer au combat contre les idées reçues. Tout le monde a vocation à pousser les portes de nos établissements ».
Dans les années à venir, ce rôle d'éclaireur sera également celui du bâtiment en lui-même, qui est en passe de connaître un vaste programme de rénovation, trente ans après son ouverture au public. En plus de l'ouverture imminente de Vill'Up, centre commercial et de loisirs, dans cette quatrième travée de l'ancienne salle des ventes à laquelle le grand public n'a jamais eu accès, cette opération privilégiera le confort des publics et des collaborateurs, ainsi que l'exemplarité environnementale. D'ailleurs, les projets ne manquent pas pour entretenir cette dynamique qui fait la particularité de l'établissement. Améliorer la convivialité de la visite, diversifier l'offre culturelle, renforcer les partenariats avec les industriels, les universités et les organismes de recherche, sans oublier, bien sûr, les points forts traditionnels tels que l'accessibilité la plus large et l'accueil des groupes scolaires, tout cela participera à réinventer encore et toujours la Cité. À coup sûr, une nouvelle mue pour de nouveaux publics ! **O. Q.**

Olivier Quezada

Après avoir assumé les fonctions de chef de projet puis de responsable des réserves du musée des Arts et Métiers, Olivier Quezada s'est tourné vers l'édition, en tant que responsable éditorial. Depuis 2007, il est rédacteur et éditeur indépendant. Il a réalisé notamment un ouvrage, *Contrefaçon*, coédité par les éditions Palette et la Cité des sciences et de l'industrie.



***Matrice liquide 3D*, œuvre de Christian Partos et Shiro Takatani. Exposition *Art robotique*, 2014-2015.** © A. Robin / EPPDCSI.

Science et cristallisation

Des cristaux d'acétate de sodium

De poudre en aiguilles

Les cristaux, solides aux couleurs multiples et formes bien définies, provoquent souvent l'émerveillement. Mais comment se forment-ils ? Comment en préparer ? C'est ce que nous vous proposons de découvrir ou redécouvrir par l'expérience, en fabriquant des cristaux d'acétate de sodium.

PAR **EMMA FOLLIASSON** ET **LUDOVIC FOURNIER**, MÉDIATEUR SCIENTIFIQUE, UNITÉ CHIMIE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Commençons par un soupçon de théorie. Lorsque des cristaux se forment, les constituants de la matière (atomes, ions ou molécules) s'organisent les uns par rapport aux autres : ils passent d'un état désordonné à un état ordonné. Pour illustrer ce processus, imaginez la construction d'un mur à partir d'un tas de briques (fig. 1). Ainsi, une cristallisation est souvent longue, délicate et influencée par de nombreux paramètres tels que solvant, température ou concentration. Nous avons choisi ici de fabriquer de l'acétate de sodium car il cristallise facilement et donne de beaux cristaux. Pour cela, prenez le matériel suivant : casserole, cuillère, thermomètre, bol, filtre à café, assiette ou plat en pyrex.



« Tas de cubes » illustrant la structure interne désordonnée d'un liquide (ou d'un gaz).

« Mur de cubes » illustrant la structure interne ordonnée d'un cristal (solide).

Figure 1. Illustration du processus se déroulant lors d'une cristallisation : les constituants de la matière (représentés ici par de petits cubes) s'organisent les uns par rapport aux autres.
© Universcience / E. Folliasson et L. Fournier.



Figure 2. L'ajout du bicarbonate de sodium dans le vinaigre s'accompagne d'un intense dégagement gazeux de dioxyde de carbone.
© Universcience / E. Folliasson et L. Fournier.

SYNTHÉTISER DE L'ACÉTATE DE SODIUM

Dans une casserole, verser 660 mL (soit environ 660 g) de vinaigre blanc à 8 % (contenant 8 % d'acide acétique), puis ajouter *petit à petit* 67 g de bicarbonate de sodium à l'aide d'une cuillère (fig. 2). Un dégagement gazeux relativement intense a lieu car la transformation du bicarbonate de sodium en acétate de sodium produit du dioxyde de carbone (CO_2). Mélanger jusqu'à ce que le dégagement gazeux s'arrête, signe que la transformation chimique est terminée. L'acétate de sodium synthétisé étant très soluble dans l'eau, il est complètement dissous. Il faut l'extraire maintenant du mélange obtenu.

ISOLER L'ACÉTATE DE SODIUM

Laisser le mélange dans la casserole et le chauffer (sur une plaque électrique par exemple) pour évaporer l'eau. Agiter de temps en temps et contrôler la température avec un thermomètre pour qu'elle reste comprise entre 80 et 90 °C, afin d'éviter la dégradation de l'acétate de sodium (fig. 3a). Après environ 2 heures, une très grande partie de l'eau s'est évaporée et un film blanchâtre apparaît à la surface du mélange (fig. 3b) : les premiers microcristaux d'acétate de sodium se forment.







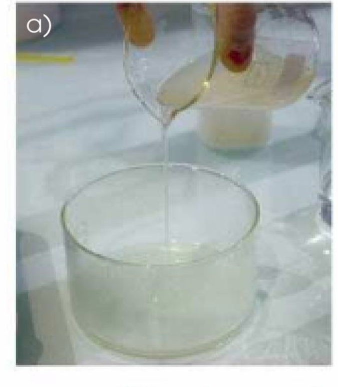
Figure 3. **a) Chauffer le mélange bicarbonate de sodium/vinaigre pour évaporer une grande partie de l'eau. b) Stopper le chauffage lorsqu'un dépôt blanchâtre apparaît à la surface. c) Après avoir été refroidis et séchés sur du papier filtre, les petits cristaux d'acétate de sodium sont prêts à être recristallisés.** © Universcience / E. Folliasson et L. Fournier.

Cesser alors de chauffer et verser le contenu de la casserole dans un bol (sans vous brûler !). Laisser refroidir jusqu'à ce que toute la solution devienne solide. Sortir le solide du bol à l'aide de la cuillère, puis l'étaler sur un filtre à café afin de le sécher. Environ 110 g de petits cristaux d'acétate de sodium sont obtenus (fig. 3c). Il est possible d'en obtenir de plus beaux en effectuant une étape de recristallisation.

RECRISTALLISER L'ACÉTATE DE SODIUM

Dans la même casserole, introduire 80 g d'acétate de sodium précédemment isolé ainsi que 40 g d'eau. Chauffer ce mélange à feu doux, en remuant régulièrement. Après quelques minutes, l'acétate de sodium est dissous complètement. Verser alors tout ou partie du mélange (sans vous brûler) de manière à recouvrir le fond d'une assiette ou d'un plat en pyrex (fig. 4a). Laisser refroidir sans bouger le récipient afin de ne pas perturber le processus de cristallisation. La solution est *sursaturée* car elle contient plus d'acétate de sodium qu'elle ne peut en dissoudre normalement. Ainsi, après environ 10 minutes, l'excédent d'acétate de sodium cristallise sous forme de grandes aiguilles (fig. 4b).

Cette étape peut être réitérée. Pour cela, remettre les aiguilles d'acétate de sodium dans la casserole, ajouter quelques millilitres d'eau, chauffer à feu doux pour dissoudre les cristaux et déposer tout ou partie du mélange dans l'assiette ou le plat en pyrex. Attendre environ 10 minutes pour observer à nouveau la formation de cristaux.



b)

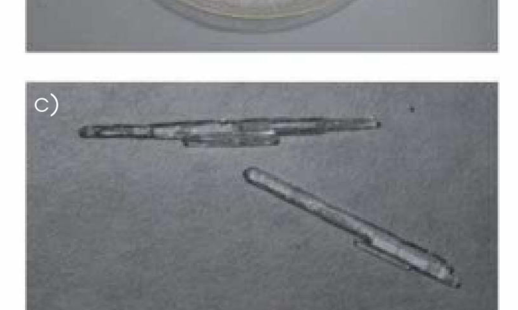


Figure 4. **a) Dissoudre une partie de l'acétate de sodium dans de l'eau, puis verser la solution encore tiède dans un récipient. Laisser refroidir quelques minutes. L'acétate de sodium cristallise (en piégeant un peu d'eau) sous forme de grandes aiguilles (b) pouvant mesurer plusieurs centimètres (c).** © Universcience / E. Folliasson et L. Fournier.

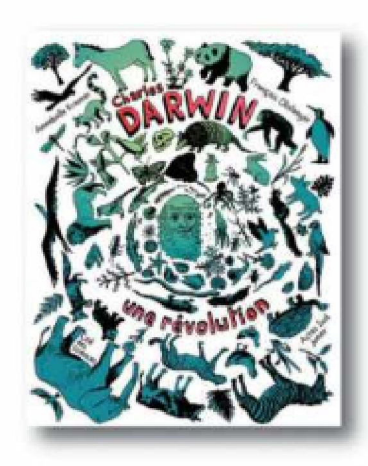
Terminons maintenant par un zeste de réflexion. Si la formation d'un cristal est comparée à la construction d'un mur, les briques de ce dernier sont organisées par le maçon, mais comment les constituants du cristal s'organisent-ils ? **E. F. et L. F.**

Pour en savoir plus

Pénicaud A., *Les cristaux – Fenêtres sur l'invisible*, Ellipses, 1999.

Polonovski V., « Fabriquez vos cristaux », *Découverte* n° 380, mai-juin 2012, p. 68-69.

Charles Darwin, une révolution



Charles Darwin, une révolution, texte d'Annabelle Kremer, illustrations de François Olislaeger, Paris, Actes Sud junior / Cité des sciences et de l'industrie, 2015, 70 pages, 22,5 × 28,5 cm, 15,90 €.

« Sur les pas de Darwin aux Galápagos », application numérique consultable sur le site http://www.cite-sciences.fr/juniors/darwin-galapagos/

Deux publications afin de marcher sur les traces de Charles Darwin. Un très bel album illustré pour suivre les grandes étapes de la vie et de la pensée du célèbre biologiste, dont l'aboutissement fut la théorie de l'évolution, et une application en ligne très attractive, pour parfaire et vérifier ses connaissances.

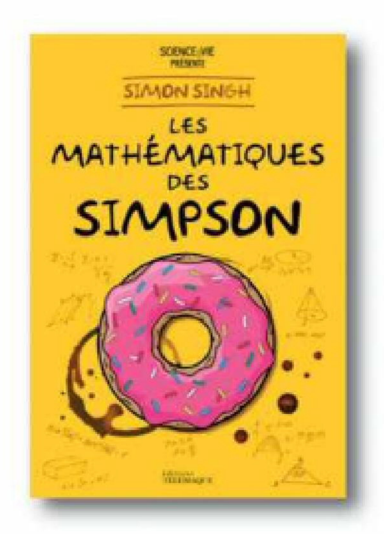
PAR **CHRISTINE WARIN**

C'est à un voyage au plus près de l'homme Charles Darwin (1809-1882), de ses préoccupations, observations et conclusions géniales que nous convie cet ouvrage. Celui-là ravira les jeunes, auxquels il s'adresse, et les moins jeunes, tant il est concis, élégant et juste, par ses textes clairs et ses dessins alliant style et rigueur scientifique. De son expédition fondatrice à bord du Beagle à ses expériences d'éleveur de pigeons ou de jardinier, en passant par sa passion pour les vers de terre ou son rôle de père de famille aimant, les multiples facettes du savant sont abordées, terreau fertile sur lequel a germé l'ensemble de ses écrits et théories. Pour accompagner cette lecture, rien de mieux que de se plonger dans l'application numérique « Sur les pas de Darwin aux Galápagos ». Destinée au public des 8-12 ans, elle aborde les écosystèmes des îles des tortues géantes, la classification animale et végétale, l'évolution et la sélection naturelle. Éducative et interactive, d'un graphisme mêlant cartes anciennes et dessins modernes, elle explique, à l'aide de modules gais et colorés, les liens de parenté entre espèces, initie les enfants à la classification ou leur offre de tester leurs connaissances avec un quiz. Ces deux éditions, imprimée et numérique, se complètent parfaitement pour aller à la rencontre du grand Charles Darwin. Elles sont l'exemple d'un pont réussi entre les supports d'accès au savoir et au jeu, preuve que le principe d'apprendre en s'amusant ne se réduit pas à un type de média. **C. W.**

Les mathématiques des Simpson

Quand une poignée de scientifiques férus de mathématiques se retrouvent scénaristes d'une série d'animation mondialement célèbre, ils saisissent l'occasion d'intégrer, de façon plus ou moins subliminale, des éléments de mathématiques dans la culture populaire. C'est en tout cas ce qui se passe avec *Les Simpson* et *Futurama,* comme le révèle Simon Singh dans son dernier livre.

PAR **GUILLAUME REUILLER**



***Les mathématiques des Simpson*, de Simon Singh, Paris, éditions Télémaque, 2015, 300 pages, 14,7 × 21,5 cm, 22 €.**

Les Simpson est une série d'animation à la longévité exceptionnelle (vingt-six saisons !), grand public, de très bonne qualité et… truffée de références aux mathématiques. Ainsi, dans l'épisode « Homer^3 », apparaît pendant quelques secondes : « $1\,782^{12} + 1\,841^{12} = 1\,922^{12}$ », ce qui choque tout connaisseur du théorème de Fermat-Wiles. En effet, ce dernier nous apprend que ce genre d'égalité est impossible à obtenir ! Et, effectivement, le calcul nous montre qu'elle est fausse, mais avec une marge d'erreur minuscule. David Cohen a écrit spécialement un algorithme pour créer ce « gag d'arrêt sur image », qui est passé inaperçu aux yeux d'une grande partie du public, mais pas pour les « nerds » fans de la série. Cet exemple prouve la motivation de certains scénaristes à incorporer des éléments de mathématiques dans *Les Simpson*. Les nombres premiers, l'infini, la topologie, les nombres pi ou e, P = NP… : tous les classiques de la culture mathématique y passent ! Le paroxysme est atteint avec la série *Futurama*, partageant avec *Les Simpson* le même créateur et quelques scénaristes, et occupant le dernier quart du livre : ce n'est rien de moins qu'un (petit) théorème qui a été démontré juste pour les besoins du scénario d'un épisode ! Le livre recense, décode et complète quelques exemples de ces allusions aux mathématiques. Comme toujours, les explications du talentueux Simon Singh sont d'une grande clarté et parsemées d'humour. Tout au plus pourra-t-on regretter que certains points ne soient pas plus développés, mais il est incontestable que cela contribue à donner de la fluidité à ce livre se dévorant le sourire aux lèvres, avec l'envie irrépressible de (re)voir les épisodes cités. **G. R.**

L'Univers se dévoile
au Planétarium

Pour aller plus loin dans la compréhension de l'Univers



© Palais de la découverte.

Confortablement installé sous une voûte de 15 mètres, le spectateur se trouve plongé sous un ciel étoilé d'un réalisme saisissant. Guidé par un conférencier, il peut suivre la course des planètes dans le ciel au cours des prochaines années ou découvrir le ciel des Égyptiens il y a 4 000 ans, aborder la mécanique céleste et observer les beautés du ciel austral. Il peut aussi quitter la Terre et, transporté sur une autre planète, visualiser le système solaire. Du fonctionnement des étoiles à la structure de la Voie lactée, en passant par l'évolution du Soleil au cours des prochains milliards d'années, le Planétarium enchantera grands et petits par un subtil mélange où se confondent émotion, science et rêve.

→ PROGRAMME d'octobre 2016 à juin 2017

Mardi		Mercredi		Jeudi		Vendredi	
10 h 00	Initiation à l'astronomie (niveau primaire)	11 h 30	Initiation à l'astronomie (niveau collège)	10 h 00	Initiation à l'astronomie (niveau primaire)	10 h 00	Initiation à l'astronomie (niveau primaire)
11 h 30	Initiation à l'astronomie (niveau collège)	14 h 00	Séance pour les centres de loisirs	11 h 30	Initiation à l'astronomie (niveau collège)	11 h 30	Initiation à l'astronomie (niveau collège)
14 h 00	Initiation à l'astronomie (niveau lycée)	15 h 15	**Initiation à l'astronomie** (spécial jeune public)	14 h 00	Initiation à l'astronomie (niveau lycée)	14 h 00	Initiation à l'astronomie (niveau lycée)
15 h 15	Le système solaire			15 h 15	Les éclipses	15 h 15	Étoiles et galaxies
16 h 30	Étoiles et galaxies	16 h 30	Le phénomène des saisons	16 h 30	Le ciel austral	16 h 30	Les trois mouvements de la Terre

Le système solaire
Combien de planètes voit-on à l'œil nu ? Quelles sont les lois qui régissent les mouvements des planètes ? Quelle est la différence entre une vision héliocentrique et géocentrique du système solaire ? Pourquoi les planètes changent-elles de sens par rapport aux étoiles à certaines époques ? Qu'est-ce qu'une conjonction et une opposition ?

Étoiles et galaxies
Est-il vrai que les étoiles sont des soleils ? Les étoiles les plus brillantes sont-elles les plus proches ? Voit-on à l'œil nu des étoiles déjà mortes ? De quoi sont constitués ces astres ? Qu'est-ce que la Voie lactée ? Où se trouve le système solaire dans la Voie lactée ? Existe-t-il d'autres galaxies dans l'Univers ? Peut-on en observer à l'œil nu ? Qu'est-ce qu'une supernova ?

Initiation à l'astronomie (spécial jeune public)
Cette séance s'adresse en priorité aux jeunes à partir de 6 ans.
On y explique des notions de base en astronomie : description du ciel étoilé, mouvement de la voûte céleste, visibilité des constellations selon les saisons et selon le lieu, repérage des planètes à observer à l'œil nu.

Le phénomène des saisons
Les saisons, leurs causes et leurs conséquences. À quoi sont-elles dues ? Qu'est-ce qu'un solstice et un équinoxe ? Pourquoi les hauteurs méridiennes du Soleil varient-elles selon les saisons ? Les saisons dépendent-elles de la distance Terre-Soleil ? Pourquoi sont-elles inversées d'un hémisphère à l'autre ? Quelle est la saison la plus longue ?

Les éclipses
Pourquoi n'y a-t-il pas d'éclipses de Lune ou de Soleil tous les mois ? À quelles phases de Lune se déroulent les éclipses ? Que sont les nœuds de l'orbite lunaire ? Quelle est la différence entre une éclipse totale, annulaire et partielle ? Pourquoi les éclipses de Lune sont-elles visibles de tout un hémisphère alors que les éclipses de Soleil ne concernent qu'une petite zone sur Terre ?

Le ciel austral
Observer le ciel nocturne depuis les Antilles, l'île de la Réunion ou l'Australie. Où faut-il être sur Terre pour contempler les Nuages de Magellan et la constellation de la Croix du Sud ? Pourquoi découvre-t-on de nouvelles constellations en se déplaçant en latitude ? Y a-t-il une Étoile polaire dans l'hémisphère sud ? Comment s'effectue le mouvement du Soleil selon les saisons dans l'hémisphère sud ?

Les trois mouvements de la Terre
Étude et conséquences du mouvement diurne, du mouvement annuel et du mouvement de précession des équinoxes. Les Égyptiens utilisaient-ils notre Étoile polaire actuelle pour s'orienter ? Nos ancêtres voyaient-ils le même ciel que nous ? Quelle est la cause du déplacement de l'axe de rotation de la Terre au fil des siècles ? Quel sera le ciel visible en France en l'an 14 000 ?

Notre satellite la Lune
Pourquoi la Lune change-t-elle d'aspect au cours d'un mois ? Quand peut-on voir les premier et dernier quartiers ? Pourquoi voit-on toujours la même face de la Lune ? Comment se présente la Lune sous d'autres latitudes ? Pourquoi les pleines lunes d'été sont-elles basses sur l'horizon sud au contraire des pleines lunes d'hiver ?

Samedi

11 h 30	Le phénomène des saisons
14 h 00	Étoiles et galaxies
15 h 15	**Initiation à l'astronomie** (spécial jeune public)
16 h 30	Le système solaire

Dimanche

11 h 30	Le ciel austral
14 h 00	Notre satellite la Lune
15 h 15	**Initiation à l'astronomie** (spécial jeune public)
16 h 30	Étoiles et galaxies

Vacances scolaires du mardi au dimanche + jours fériés

11 h 30	Le système solaire
12 h 45	Notre satellite la Lune*
14 h 00	Le ciel austral
15 h 15	**Initiation à l'astronomie** (spécial jeune public)
16 h 30	Étoiles et galaxies

* Vacances de la Toussaint et de Noël uniquement

***Revue du Palais de la découverte* n° sp. 49 :**
« Au Planétarium, l'Univers se dévoile »
Franco France : 4,42 € - DOM : 4,73 €
Étranger : 5,18 €
Contact : revue@universcience.fr
Tél. : 01 40 74 80 91 / 01 40 74 80 93

La science en action
au Palais de la découverte

Expositions, Expériences, Exposés, Animations

Faites vos jeux ! Quand les maths s'en mêlent

→ Du 6 décembre 2016 au 27 août 2017

Qu'est-ce que le hasard ? Avec quels outils les mathématiciens parviennent-ils à le décrire et même à l'utiliser ? L'exposition *Faites vos jeux ! Quand les maths s'en mêlent*, conçue par le Mathematikum de Giessen (Allemagne) et adaptée par le Palais de la découverte, traite de l'aléatoire de manière ludique ! Une quarantaine de manipulations sur table (dés, pile ou face, roulette, loterie, codes secrets…), d'éléments multimédias et d'expériences visuelles, sonores, informatiques et collaboratives sont proposés. Ils permettent de découvrir en s'amusant les outils fondamentaux des mathématiciens destinés à analyser, prévoir ou encore mettre à profit les phénomènes aléatoires ; des notions qui changent notre perception du quotidien et sont indispensables au développement de bien des disciplines scientifiques ! Ainsi, dans une ambiance évocatrice, vous pourrez vous familiariser avec les événements équiprobables et ceux qui ne le sont pas, la loi des grands nombres, les statistiques, phénomènes chaotiques, applications inattendues du hasard, la cryptographie… Un thème fascinant qui vous permettra de faire le lien avec d'autres disciplines (physique, biologie, sociologie, arts…).

www.palais-decouverte.fr

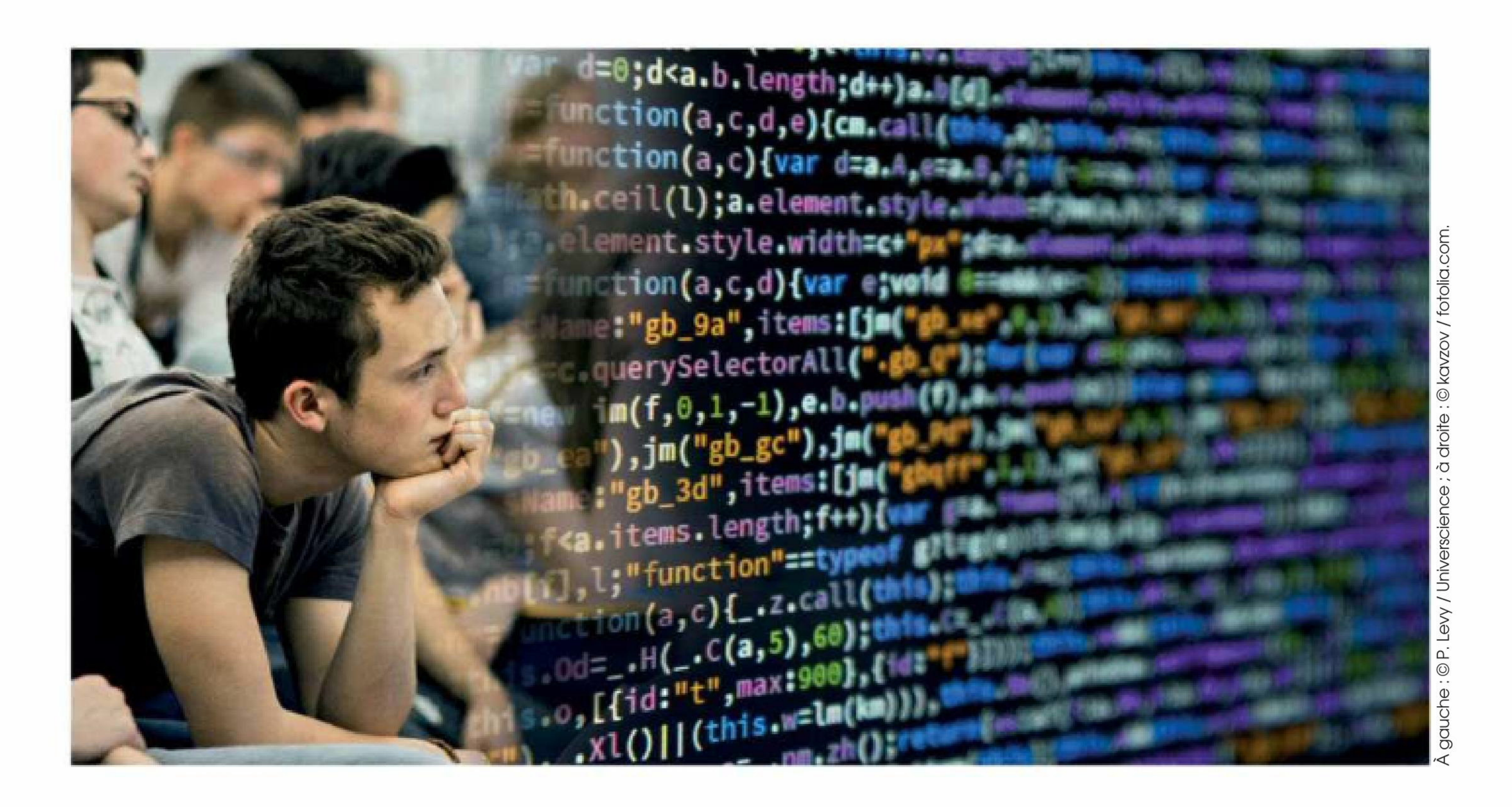


Viral
Du microbe au fou rire, tout s'attrape

→ Du 18 octobre 2016 au 27 août 2017

Qui dit contagion dit le plus souvent virus, bactéries et maladies… Pourtant, la santé n'est pas le seul domaine de la contagion. *Viral, du microbe au fou rire, tout s'attrape* en fait la démonstration, rappelant les conditions nécessaires à la contamination : la transmission d'un agent (virus, bactérie, émotion) d'une personne à une autre, dans un réseau social… Au long d'une scénographie en trois parties – « Qu'est-ce que la contagion ? », « La diversité de la contagion » et « Nous sommes contagieux », le visiteur découvre ce qu'est une épidémie et comment elle peut être contrôlée, tests et quiz à l'appui. Progressivement, il aborde la contagion dite « sociale » : rire, empathie, bâillement, et la « viralité » telle qu'on l'entend sur Internet et les réseaux sociaux. Conçue et réalisée par Ciência Viva à Lisbonne, en coproduction avec la Cité des sciences et de l'industrie et Heurêka à Helsinki, *Viral* est présentée au Palais de la découverte.

www.palais-decouverte.fr



À gauche : © P. Levy / Universcience ; à droite : © kavzov / fotolia.com.

Une nouvelle unité scientifique au Palais de la découverte

Participez à la création d'un espace dédié à l'informatique et aux sciences du numérique !

L'informatique est présente partout et rythme aujourd'hui notre quotidien. Fidèle à sa mission de partage et de transmission des savoirs, le Palais de la découverte créera dès 2017 un lieu d'exposition et de médiation dans lequel chaque citoyen pourra acquérir les connaissances nécessaires pour s'intégrer et inventer le monde de demain. Ce nouvel espace accueillera notamment une exposition permanente interactive où seront présentés les quatre principaux constituants de l'informatique : les machines, les algorithmes, les codes et les données. On y parlera aussi de *big data*, d'intelligence artificielle, de robots, de réseaux… Des médiateurs s'adresseront quotidiennement au grand public et aux scolaires sous forme d'exposés et d'ateliers.

Aidez-nous à transmettre le goût des sciences. Faites un don !

Bon de soutien

OUI, je soutiens ce projet en faisant un don de :

☐ **50 €** ☐ **200 €** ☐ **500 €** ☐ **1 000 €**

☐ **Autre : .... €**

Votre don ouvre droit à une réduction fiscale de 66 % de son montant (impôt sur le revenu) ou 75 % (ISF) ainsi qu'à des avantages exclusifs (invitations…).

Nom / Prénom : ....

Adresse : ....

CP / Ville : ....

Téléphone : ....

Courriel : ....

Merci d'adresser ce bulletin complété et accompagné de votre chèque à l'ordre de l'**agent comptable de l'EPPDCSI** à :
Palais de la découverte – Délégation au mécénat – Avenue Franklin-D.-Roosevelt – 75008 Paris
Renseignements : mecenat@universcience.fr / Tél. : 01 40 74 60 29

Table des matières

par auteurs

Articles publiés dans *Découverte* du n° 402 (janvier-février 2016) au n° 407 (novembre-décembre 2016)

\B

\C



\ F

\ G

\ H









\ L

\ M





Table des matières

par articles

Articles publiés dans *Découverte* du n° 402 (janvier-février 2016) au n° 407 (novembre-décembre 2016)





MATHÉMATIQUES

SCIENCE EN SOCIÉTÉ

EN COULISSES

REGARD SUR...

LA SCIENCE À PORTÉE DE MAIN

COUPS DE CŒUR

RÉCOMPENSES

DIVERS



Un magazine scientifique à destination d'un large public qui propose des articles de fond couvrant un champ étendu de disciplines en lien avec l'actualité, les problématiques de société et les expositions de l'établissement.

Bimestriel – 6 numéros par an
Prix d'un numéro franco France : 7,11 €
DOM : 8,11 € **– Étranger :** 9,00 €

- **Grâce à *Découverte***, prenez connaissance de nombreux sujets en relation avec l'actualité scientifique et les expositions du Palais de la découverte et de la Cité des sciences et de l'industrie.
- **Extrêmement accessibles et très illustrés**, les articles de fond s'articulent autour de quatre grandes rubriques : *Terre & Univers, Matière & Énergie, Vivant \ Santé & Environnement, Mathématiques*. Ils informent sur l'évolution des sciences et de leurs applications. Une cinquième rubrique analyse les problématiques de *Science en société*, alors que *En coulisses* vous permet de voir l'envers du décor ou la naissance d'une exposition, par exemple.
- **Retrouvez également** les *Sciences Actualités, Curiosités célestes, Formes mathématiques*, *Coups de cœur*...

Bulletin d'abonnement n° 407

à retourner avec votre règlement à la revue *Découverte*
Palais de la découverte, avenue Franklin-D.-Roosevelt, 75008 Paris

Je souscris un abonnement de 1 an à la revue *Découverte* (6 numéros par an) et je joins mon règlement par chèque ou par virement à l'ordre de l'**agent comptable de l'EPPDCSI**.

Identifiant national de compte bancaire – RIB (relevé d'identité bancaire)				
Code banque	Code guichet	N° de compte	Clé RIB	Domiciliation
10071	75000	00001000045	42	TPPARIS RGF

Identifiant international de compte bancaire – IBAN (International Bank Account Number)							
							BIC (Bank Identifier Code)
FR76	1007	1750	0000	0010	0004	542	TRPUFRP1

❍ **Tarif annuel :** 25 €/an
❍ **Tarif réduit (titulaire du Pass) :** 20 €/an
❍ **Abonnement de soutien :** 35 €
❍ **Tarif étranger :** 31 € (par avion, supplément de 15 €)

Règlement uniquement par chèque français ou virement avec les frais d'opérations à votre charge. Pour l'étranger, nous contacter pour plus de renseignements :
tél. : +33 1 40 74 80 91 / 93 – fax : +33 1 40 74 80 94 –
courriel : revue@universcience.fr

❍ **M.** ❍ **Mme**

Nom : .... **Prénom :** ....

Adresse : ....

Code postal : .... **Ville :** ....

Profession : ....

Courriel : ....

Conformément à l'article 27 de la loi Informatique et libertés, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Sauf opposition de votre part, ces informations pourront être utilisées par des tiers. Si vous ne le souhaitez pas, cochez cette case ❍

Universcience, le plus court chemin vers la science

Universcience, qui regroupe le Palais de la découverte et la Cité des sciences et de l'industrie, a pour ambition de faire connaître et aimer les sciences d'aujourd'hui ainsi que de promouvoir la culture scientifique et technique.

Conçue en étroite collaboration avec les chercheurs, enrichie par la médiation humaine, la proposition culturelle déployée par Universcience à Paris, sur chacun de ses deux sites, mais aussi en région et à l'international, ainsi que sur Internet, s'adresse à tous les publics, dès l'âge de 2 ans.

Établissement public national, Universcience est subventionné par l'État (ministère de la Culture et de la Communication, ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche).

www.universcience.fr

Palais de la découverte – un lieu Universcience

- → **Au sein des six unités :** astronomie, chimie, mathématiques, physique, sciences de la Terre et sciences de la vie, le public est conduit à observer, réfléchir, tester pour accéder par lui-même à la connaissance.
- → **Exposés et expériences scientifiques :** plusieurs dizaines par jour, présentés par des médiateurs scientifiques.
- → **Expositions commentées sur des thèmes d'actualité.**
- → **Ateliers et activités pour les jeunes.**
- → **Comme le Planétarium et l'électrostatique** font toujours le succès du Palais de la découverte, une programmation ambitieuse, variée et sans cesse renouvelée suscite toujours un peu plus la curiosité du public.

Tarifs d'entrée

Plein tarif :
Salles d'expériences et de conférences 9 €
Supplément Planétarium 3 €

Tarif réduit :
Salles d'expériences et de conférences 7 €
Supplément Planétarium 3 €

Ateliers : 3 €

Pass Universcience :
Accès illimité aux expositions permanentes et temporaires et aux animations, au Planétarium du Palais de la découverte et, sur réservation, au Planétarium de la Cité des sciences et de l'industrie, au sous-marin *Argonaute* et à la Cité des enfants.
Pour connaître les autres avantages : www.universcience.fr

Autres réductions et renseignements :
01 56 43 20 23

Accès

Ouverture :
Du mardi au samedi de 9 h 30 à 18 heures
Le dimanche et jours fériés de 10 à 19 heures

Standard : 01 56 43 20 21
Serveur vocal : 01 56 43 20 20
Site Internet : www.universcience.fr, onglet Le Palais de la découverte

Planétarium :
Renseignements : 01 56 43 20 21

Bureau des visites en groupes :
01 56 43 20 25

Métro :
Champs-Élysées Clemenceau
ou Franklin-D.-Roosevelt

Autobus :
28, 42, 52, 63, 72, 73, 80, 83, 93

RER : Invalides

Amis du Palais de la découverte

Pour connaître les activités réservées à ses membres :

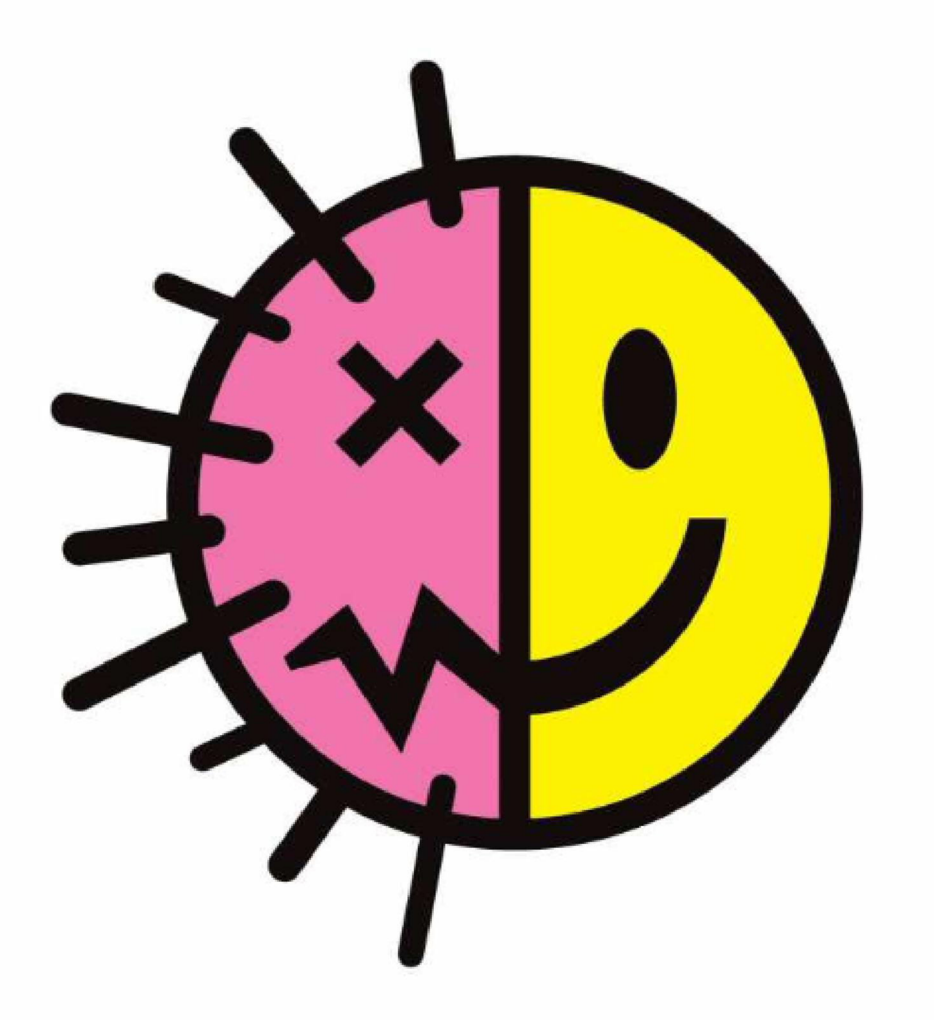
Courriel :
amis-palais-decouverte
@hotmail.com

Tél. : 01 40 74 81 08
Fax : 01 40 74 81 81



#Cviral

80 ans
Palais



Du microbe au fou rire, tout s'attrape

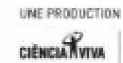
VIRAL

Exposition > 18.10.16 > 27.08.17

Ⓜ Champs-Élysées Clemenceau Ⓜ Franklin Roosevelt



UNE PRODUCTION



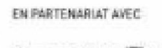


AVEC





EN PARTENARIAT AVEC



Direct Matin SCIENCE Télérama Society So Foot franceinfo: